

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Obrábění korozivzdorných ocelí

Machining of Stainless Steels

Student:

Bc. Dalibor Jurok

Vedoucí diplomové práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petruš, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Dalibor Jurok**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Obrábění korozivzdorných ocelí**
Machining of Stainless Steels

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky obrábění korozivzdorných ocelí.
2. Návrh experimentální činnosti.
3. Realizace experimentální činnosti.
4. Měření a vyhodnocení naměřených dat.
5. Závěrečné zhodnocení výsledků.

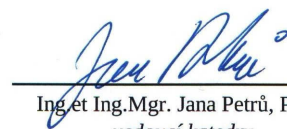
Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [3] HAVRILA, Michal; ZAJAC, Jozef; BRYCHTA, Josef; JURKO, Jozef; *Top trendy v obrábění, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [4] ZAJAC, Jozef; JURKO, Jozef; ČEP, Robert. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012
Datum odevzdání: 20.05.2013


Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

16. 5. 2013

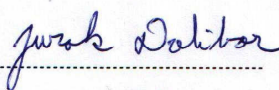
Jurak Dalibor

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucí diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že se s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 16.5.2013


podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Dalibor Jurok

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Janovice č. 439, 739 11

okr. Frýdek - Místek

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JUOK, D. *Obrábění korozivzdorných ocelí: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2013, 60 s. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petru, Ph.D.

Diplomová práce řeší problematiku obrábění korozivzdorných ocelí. Teoretická část je věnována problematice korozivzdorných ocelí, rozdělení jednotlivých druhů ocelí, drsnosti povrchu spolu s charakteristikou drsnosti povrchu, frézování a měření jednotlivých řezných sil.

V experimentální části jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu na vzorcích ocelí 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240. Při frézování na piezoelektrickém dynamometru KISTLER typ 9255B. Výsledky byly vyhodnoceny, a výsledkem jsou hodnoty řezných složek sil F_{fn} , F_f a F_p .

V závěru je zhodnocena kvalita obrobeného povrchu po čelním frézováním na uvedených vzorcích ocelí. Kvalita je také hodnocena v závislosti složek řezných sil na zvolených řezných podmínkách.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

JUOK, D. *Machining of Stainless Steels: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2013, 60 p. Thesis head: Jana Petru, Ph.D., multi MSc. M.A.

This thesis deals with issues of machining stainless steels. The theoretical part is devoted to problems of stainless steels, dividing steels into different sorts, surface roughness along with surface roughness characteristic, milling and cutting force measurement.

In the experimental part the surface roughness values are shown on samples of steel 1.4301 (X5CrNi18-10) DIN 17 240 milled on the piezoelectric dynamometer KISTLER type 9255B. The results were evaluated, and as a result are cutting component values of forces F_{fn} , F_f and F_p .

In conclusion, the quality of machined surface after face milling is evaluated on mentioned samples of steels. The quality is also assessed in view of depending cutting force components on the selected cutting conditions.

OBSAH

OBSAH.....	1
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	3
1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY OBRÁBĚNÍ KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ	6
1.1 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí.....	6
1.2 Rozdělení obráběných materiálů.....	7
1.3 Úvod do korozivzdorných ocelí.....	9
1.3.1 Korozivzdorné oceli.....	9
1.3.2 Rozdělení korozivzdorných ocelí	10
1.3.3 Feritické oceli.....	11
1.3.4 Martenzitické oceli.....	13
1.3.5 Austenitické oceli.....	14
1.3.6 Austeniticko-feritické oceli.....	15
1.4 Drsnost povrchu	16
1.5 Základní charakteristika drsnosti povrchu podle normy.....	16
1.6 Frézování.....	18
1.7 Měření řezných sil.....	19
2. NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI.....	22
2.1 Použitý stroj	22
2.2 Použité nástroje.....	22
2.3 Vyměnitelná břitová destička „VBD“ FF WOCT 060212T IC928.....	24
2.4 Přístroj pro měření parametrů drsnosti SURFTEST SJ-210.....	25
2.5 Dynamometr KISTLER typ 9255B	26
2.6 Vzorek materiálu.....	28
2.7 Řezné podmínky pro daný experiment	30
3. REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI	32
4. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	33
4.1 Naměřená data a vyhodnocení výsledku drsnosti povrchu.....	33
4.2 Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou.....	35
4.3 Nejistoty měření.....	36
4.4 Vyhodnocení naměřených dat parametrů drsnosti povrchu.....	40
4.4.1 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu – ocel 1.4301 ČSN 17 240, osa „x“	40
4.4.2 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu – ocel 1.4301 ČSN 17 240, osa „y“	42

4.5. Vyhodnocení naměřených dat složek řezných sil.....	47
4.5.1 Odečtené hodnoty složek řezných sil z grafů – ocel 1.4301 ČSN 17 240.....	48
4.5.2 Strukturální rovnice podle funkčních závislosti pro 2 proměnné	53
5. ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57
SEZNAM PŘÍLOH.....	60

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_5	tažnost oceli [%]
D	průměr stopy nástroje [mm]
D_1	řezný průměr nástroje [mm]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
HV	tvrdost podle Vickers [-]
L	celková délka nástroje [mm]
U_C	rozšířená standardní nejistota [μm]
$Z_{1\text{MAX}}$	max. odchylka j-tého zdroje nejistoty vlivu opěrné patky drsnoměru [μm]
Z_P	nejvyšší výstupek profilu [μm]
Z_u	počet břítu
Z_v	nejnižší výstupek profilu [μm]
$Z_{(x)}$	výška profilu v libovolné poloze x [μm]
a_p	hloubka řezu [mm]
f_n	posuv na otáčku [mm]
f_z	posuv na zub [mm]
k_u	koeficient rozšíření při stanovení rozšířené nejistoty [-]
l_n	vyhodnocovaná délka profilu [mm]
l_r	základní délka profilu [mm]
$s(x)$	směrodatná odchylka [mm]

F_{fn}	síla normálová [N]
F_f	síla posuvu [N]
F_p	síla pasivní [N]
n	otáčky [min^{-1}]
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [μm]
Rq	průměrná kvadratická úchylka profilu [μm]
Rz	největší výška profilu [μm]
u_A	standardní nejistota typu A [μm]
u_B	standardní nejistota typu B [μm]
u_{B1}	nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu [μm]
u_{B2}	nejistota měřicího přístroje [μm]
u_C	kombinovaná standardní nejistota [μm]
v_c	řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_f	rychlost posuvu [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

ÚVOD

Diplomová práce se zaměřuje na téma obrábění korozivzdorných ocelí po čelním frézování.

Z důvodu rostoucího trendu rozvoje vědy a techniky jsou stále větší požadavky na problematiku jakosti strojních součástí. Efektivita třískového obrábění v technologii vychází z úspor materiálu z vysoké jakosti výrobků a z vysoké produktivity práce. K přednostem je možno ještě připojit nízké výrobní náklady, ale pouze pokud předpokládáme, že je docílena vysoká životnost nástrojů na obrábění.

Drsnost nebo-li jakost povrchu, resp. mikogeometrie povrchu a vlastnosti povrchové vrstvy, ovlivňují velmi výrazně spolehlivost a životnost provozu součástí. Na drsnosti povrchu závisí přesnost chodu strojních součástí, jejich hlučnost, doba záběru, ztráty třením, elektrická vodivost, přestup tepla, únavová pevnost, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi atd. Drsnost povrchu tedy ovlivňuje průběhy chemických a fyzikálních jevů, které provázejí činnost funkčního povrchu dané součásti.

Problematicke korozivzdorných ocelí a rozdělení do kategorií podle druhu je věnována teoretická část diplomové práce. V rámci experimentální části, byla hodnocena drsnost povrchu vzorků ocelí 1.4301 ČSN 17 240 závislosti na navržených řezných parametrech. V rámci experimentu byly také měřeny řezné síly při čelním frézování na piezoelektrickém dynamometru KISTLER typ 9255B. Naměřené výsledky byly následně vyhodnoceny do tabulek a grafu a výsledkem jsou hodnoty řezných složek sil F_{fn} , F_f a F_p .

Cílem diplomové práce je navrhnout nejvhodnější řezné parametry pro použitou ocel v závislosti hodnocení drsnosti povrchu a složek řezných sil.

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY OBRÁBĚNÍ KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ

1.1 Obrobitelnost korozivzdorných ocelí

Obrobitelnost

Obrábění kovů je technologický proces, při odebírání materiálu se vytváří požadovaný tvar obráběného předmětu (obrobku). Při obrábění je řezná hrana velkou silou vtlačována do materiálu obrobku, který je deformován tak silně, až se odděluje ve formě třísek. Výsledkem je opracovaný povrch, který má splňovat kvantitativní požadavky.

Obrobitelnost je v technologii obrábění kovů široký pojem. Je to efekt, při kterém obrábíme při nízkých nákladech a za daných technologických podmínek. Obrobitelnost ovlivňují mnoho faktorů např. řezný nástroj, materiál obrobku, řezné podmínky, strategie řezného procesu, strojní vybavení, upnutí obrobků a nástrojů, způsob chlazení a odborné znalosti technologa. Obrobitelnosti se někdy říká jako vlastnost materiálu. Obrobitelnost snižují určité přísady např.: Nb, Mo, Cr, V, Ni, Ti, Si a karbidy wolframu a zvýšení obrobitelnosti např.: S, P, Ca, Pb [1].

Obrobitelnost nerezových ocelí, vysoclegovaných slitin a titanových slitin se liší od ocelí, které jsou v současném světě obrábění kovů stále považovány za referenční materiály. Kvantitativní měřítka jsou indexy obrobitelnosti tj. průměrné hodnocení uvedené ve srovnání s referenčními materiály. Životnost nástroje tj. provozní čas v minutách a nebo čas úplného opotřebení nástroje při daných řezných parametrech. Další kvantitativní měřítka mohou být kvality povrchu, řezné síly, teplota, utváření třísek. Kvalifikace obrobitelnosti vystihuje obrábění minimálním množstvím energie, opotřebení nástroje (max životnost), řezné síly, nebo eliminovat problémy s utváření třísek. Měla být dobrá kvalita povrchu na obrobené ploše [1].

Vlastnosti obráběného materiálu rozdělíme do sedmi základních skupin, které výrazně ovlivňují řezný proces [1].

- *Mechanické vlastnosti*: obrábění je proces deformace nebo přetváření materiálu obrobku. Vysoká tvrdost materiálu obrobku znamená vysoké řezné síly.
- *Chemické složení (obsah legujících prvků)*: během obrábění je odebrán materiál (tříska), který odchází po čele nástroje. Vyšší obsah manganu způsobí větší opotřebení nástroje, mangan je velmi abrazivní materiál.

- *Tepelné vlastnosti:* při obrábění musíme regulovat vytvořené teplo a následné vysoké teploty v oblasti řezu. Teplo musíme odvádět třískami.
- *Vměstky:* jsou tvrdé částice, které ovlivňují opotřebení nástroje a riziko vylomení řezné hrany.
- *Sklon k mechanickému zpevnění:* po prvním řezu dojde k zpevnění v povrchové vrstvě obráběného materiálu a u druhý řez se stým musím vypořádat.
- *Struktura materiálu:* každý materiál se obrábí snadněji než jiné. U Austenitické materiálu dochází k tvorbě třísek nepravidelného řezu a obtížnější kontrolu utváření třísky.
- *Původní materiál:* měly se dodržovat materiálové normy

Mechanické vlastnosti

Austenitické korozivzdorné oceli jsou houževnaté a mají vysoké prodloužení. Během obrábění vznikne dlouhá tříska. Feritické, martenzitické a duplexní oceli mají většinou nízké prodloužení a během obrábění vzniká malá tříska. Tvrdost je odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Ocel s vyšší tvrdostí se měla obrábět vysokou řeznou rychlostí.

Tepelná vodivost a struktura materiálu

Korozivzdorné oceli mají nízkou tepelnou vodivost. Hlavní nedostatek korozivzdorných ocelí je, že vnesené teplo neodchází třískou, ale zůstává v místě řezu, kde negativně ovlivňuje řezný nástroj a obráběný materiál. Teplo se přenáší do řezného břitu, neodchází třískou a tím je kratší životnost nástroje. Teplota v místě řezu dosahuje teplot cca 900°C a dochází k plastické deformaci. Při obrábění nerezových ocelí dochází k zpevnění mechanismu (deformační, tuhý roztok, hranice zrn, disperzní zpevnění a precipitační vytvrzování). Deformační zpevnění se projeví, až břit řezného nástroje vnikne do obráběného materiálu, jestliže napětí přesáhne mez tažnosti [2] [32] .

1.2 Rozdělení obráběných materiálů

Při volbě nástroje, VBD a startovních řezných podmínek je jednou z nejdůležitějších věcí, správná identifikace obráběného materiálu a volbou řezného materiálu. Obráběcí materiály rozdělují v souladu s normou ISO 513 do šesti základních skupin P, M, K, N, S, H, kde jsou sjednoceny materiály.

Vyvolávají kvalitativně stejný typ namáhání břitu, nebo vyvolávají podobný typ opotřebení. V tabulce č.1 je rozdělení obráběných materiálu dle normy ISO 513. [2]

Rozdělení obráběných materiálů dle normy

P	uhlíkové (nelegované) oceli třídy 10, 11, 12 legované oceli tříd 13, 14, 15, 16 nástrojové oceli uhlíkové (191..., 192..., 193...) nástrojové legované oceli (193... až 198...) uhlíková ocelolatina skupiny 26 (4226...) nízko a středně legované ocelolitiny skupiny 27 (4227...) feritické a martenzitické korozivzdorné oceli (třídy 17..., lité 4229...)	uhlíkové (nelegované) ocele třídy 10, 11, 12 legované ocele třídy 13, 14, 15, 16 nástrojové ocele uhlíkové (191..., 192..., 193...) nástrojové legované ocele (193... až 198...) uhlíková ocelolatina skupiny 26 (4226...) nízko a středně legované ocelolitiny skupiny 27 (4227...) feritické a martenzitické korozivzdorné ocele (třídy 17..., lité 4229...)
M	austenitické a feriticko austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli nemagnetické a otěruvzdorné	austenitické a feriticko austenitické ocele korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli nemagnetické a otěruvzdorné
K	šedá litina nelegovaná i legovaná (4224...) tvárná litina (4223...) temperovaná litina (4225...)	sivá litina nelegovaná aj legovaná (4224...) tvárná litina (4223...) temperovaná litina (4225...)
N	neželezné kovy, slitiny Al a Cu	neželezné kovy, zliatiny Al a Cu
S	speciální žárupevné slitiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti	speciální žárupevné zliatiny na bázi Ni, Co, Fe a Ti
H	zušlechťené oceli s pevností nad 1500 MPa kalené oceli HRC 48 ÷ 60 tvrzené kokilové litiny HSh 55 ÷ 85	zušlechťené ocele s pevností nad 1500 MPa kalené ocele HRC 48 ÷ 60 tvrzené kokilové litiny HSh 55 ÷ 85

Tab.1 Rozdělení obráběných materiálů dle normy ISO 513 [3]

Materiál skupiny „M“

Materiál skupiny M má univerzální použití. Využívá se po obrábění materiálů, ale se vytváří dlouhá a středně dlouhá tříska. Oceli jsou lité, austenitické korozivzdorné oceli, nebo tvárné litiny. Materiály skupiny „M“ se dělí do podskupin M1, M05, M10, M15 až M40.

Se zvyšujícím se číslem podskupiny, roste houževnatost a pevnost v ohybu. Může klesat tvrdost, nebo otěruvzdornost. Z doporučených řezných podmínek klesá řezná rychlost a roste rychlost posuvu a průřez odebírané třísky. Řezné síly dosahují středních nebo až vysokých hodnot, může docházet k vydrolování ostří [4].

1.3 Úvod do korozivzdorných ocelí

1.3.1 Korozivzdorné oceli

Ušlechtilá korozivzdorná ocel je souhrnný výraz pro nerezavějící ocel. Korozivzdorné oceli obsahují minimálně 10,5% chromu. V porovnávání s nelegovanými oceli se vyznačují se výrazně lepší odolností proti korozi. Vyšší obsah chromu a legujících prvků niklu a molybdenu korozní odolnost je vyšší. Korozivzdorná ocel je legovaná ocel a tvoří skupinu oceli, které mají zvýšenou odolnost proti korozi. Oceli většinou korodují, ale koroze probíhá pomalu vzhledem k druhu prostředí „teplota a tlak“. Dolegováním dalšími prvky, lze pozitivně ovlivnit další vlastnosti. Například niob a titan zvyšují odolnost proti mezikrystalové korozi, dusík zvyšuje pevnost a korozní odolnost a síra obrobiteľnosť [5].

Od roku 1912 výrobci a zpracovatelé začínají využívat různá obchodní jména. Ušlechtilá ocel bez dodatku „korozivzdorná“ pro jejich označování nestačí, protože k ušlechtilým ocelím patří i skupiny ušlechtilých konstrukčních ocelí, rychlořezných a nástrojových ocelí s úplně jinými vlastnostmi [5].

Ušlechtilé nerezavějící oceli ve své dlouhé historii nabývaly odolností proti korozi a drobným mechanickým vlastnostem stále většího významu ve zpracovatelské oblasti. Korozivzdorné oceli se vyrábějí jako válcované a kované oceli, nebo jako odlitky.

V oblasti korozivzdorných ocelí se zvyšují požadavky na jejich vlastnosti, které dělíme:

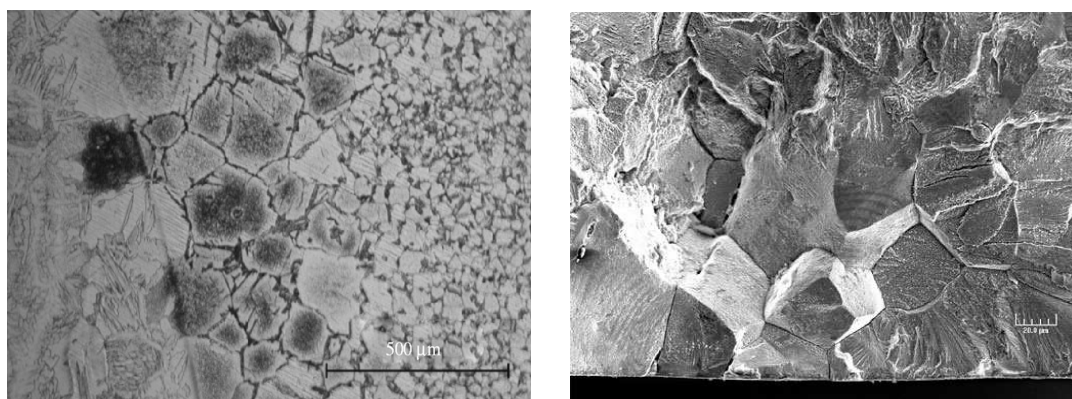
- Vývoj korozivzdorných ocelí nového, nebo změněného chemického složení.
- Zavedení progresivní technologie výroby stávajících korozivzdorných ocelí a jejich zpracování.

V posledních letech při vylepšování vlastnosti korozivzdorných ocelí většinou uplatňují nové technologie výroby, zejména metalurgické procesy, které jsou zaměřené na zvýšenou čistotu a vyšší kvalitu struktury korozivzdorných ocelí. Rozdělení a typy korozivzdorných ocelí mají svoje speciální vlastnosti a korozní odolnost v konkrétních prostředích. Spotřeba korozivzdorných ocelí v jednotlivých průmyslových oborech ukazuje, že energetický a chemický průmysl spotřebuje 45% výroby korozivzdorných ocelí, potravinářský průmysl spotřebuje okolo 25% a domácí i automobilový průmysl spotřebuje okolo 10-5% [6].

1.3.2 Rozdělení korozivzdorných ocelí

Korozivzdorné oceli a slitiny se rozdělují podle jejich chemického složení a struktury do několika základních skupin.

- Feritické
- Martenzitické (kalitelné)
- Austenitické
- Austeniticko - feritické (duplexní)



Obr.1 Struktura feritické oceli a austenitické oceli legovaná niklem [7] [8]

Podle chemického složení jsou to oceli chromové, chromniklové a chrommanganové, které mohou obsahovat další slitinové prvky. U těchto ocelí se přidávají slitinové prvky např. molybden, křemík, měď, titan, niob, dusík [9].

Korozivzdorné oceli jsou chromové slitiny se železem obsahující 12-30% chromu a 30% niklu, nebo do 24% manganu a další slitinové prvky. Chrom zajišťuje pasivitu slitin a je důležitým prvkem pro dosažení odolnosti ocelí a slitin k celkové korozi. Korozivzdorné oceli mohou být náchylné k místním druhům koroze např. koroze bodová, šterbinová, mezikrystalová nebo korozní praskání. Nežádoucí vlivy můžeme eliminovat výběr vhodné oceli, nebo slitiny pro dané podmínky a jejich správným zpracováním [9] [31].

Základním prvkem korozivzdorných ocelí je stále železo a jeho slitina s uhlíkem tzv. ocel i když obsahují chrom, nikl, mangan a další slitinné prvky. Slitina s více než 18% chromu je při sníženém obsahu uhlíku v rovnovážném stavu zcela feritická.

1.3.3 Feritické oceli

Mechanické vlastnosti feritických ocelí předpokládají jemnozrnnou strukturu, které se dosahuje příslušným tepelným zpracováním těchto ocelí. Při nízkém obsahu chromu je korozní odolnost 11-12% chromových ocelí (1.43003, 1.4512) omezená jen na atmosférické podmínky, nebo na vodnaté média, takže tyto oceli jsou zařazovány také jako „korozně málo aktivní“ [5].

Feritické oceli dělíme do dvou skupin:

- s obsahem asi 11-13% Cr
- s obsahem asi 17% Cr

Při 17% chromových ocelí se díky vyššímu obsahu chromu dosahuje vyšší odolnosti proti korozi. Dolegováním asi 1% molybdenu se může odolnost proti korozi ještě zvýšit.

Některé oceli obsahují titan, nebo niob jako karbidotvorné prvky, které na sebe váží uhlík. Takové oceli jsou stále i po svařování bez doplňkového tepelného zpracování i případně větších tloušťek, jsou stabilní proti mezikrystalové korozi. Zvláštní předností feritických korozivzdorných ocelí je to, že v protikladu k austenitickým chromniklové ocelí vynikají vysokou odolností proti transkrystalové korozi při mechanickém napětí [5].

Fyzikální vlastnosti feritických korozivzdorných ocelí

Málo se liší od vlastností martenzitických ocelí. Tepelná roztažnost ocelí klesá s rostoucím obsahem chromu, pokud se v nich neobjevují austenitické, jehož roztažnost je mnohem větší. Feritické ocelí mají tepelnou roztažnost jako některé druhy skla a hodí se pro zátavy při výrobě elektronek, obrazovek, rentgenek. Tepelná vodivost chromových ocelí klesá s rostoucím obsahem chromu, ale jen při nízkých teplotách. Tepelná vodivost ocelí s vyšším obsahem chromu s teplotou vzrůstá. Feritických chromových ocelí s nízkým obsahem uhlíku se používají jako magnetické měkké materiály, je-li žádoucí odolnost proti korozi např. na rotorové plechy elektromotorů ponorných čerpadel na vodu [9].

Křehnutí a vrubová citlivost

U feritické korozivzdorné ocelí nemůže být pevnost a tvrdost zvyšována klasickým způsobem, ale omezeným tepelným zpracováním. Tyto oceli se stávají křehkými a plastické vlastnosti a houževnaté vlastnosti klesají. Máme tři různé mechanické křehnutí.

Rozdělení mechanického křehnutí:

- křehnutí za vysokých teplot: mají střední a nebo vysoký obsah uhlíku a dusíku a při normální teplotě jsou křehké, ale musí být předtím vyhřáté na teplotu nad cca 1000 °C
- křehnutí tvorbou fáze sigma: většinou se objeví ve struktuře ocelí a obsahují chrom a teplota vystavení je 600-800°C
- křehnutí při 475°C : vyznačují se zvýšenou tvrdostí a pevností, za snížení tažnosti a odolnosti vůči rázu při ovlivněné teplotě cca 350-550°C

Všechny uvedené projevy mohou ovlivnit mechanické vlastnosti. Zvláště křehnutí za vysokých teplot je závažné. Ve strojírenství musí být materiály schopny svařování a technologické zpracování při zachování kujnosti, houževnatosti a korozní odolnosti [9].

1.3.4 Martenzitické oceli

Ocel s obsahem 12-18% chrómu a obsahem uhlíku od 0,1% je ocel, která při vysoké teplotě je plně austenitická. Pokud austenitickou oblast rychle ochladíme tzv. kalíme, vznikne martenzitická struktura. Austenitizační teploty leží v závislosti na druhu ocelí mezi 950-1050°C. Vytvrzování probíhá většinou mnohem pomaleji, než u srovnatelných nelegovaných ocelí (např. ochlazení na vzduchu). Tvrdost ocelí zaleží na obsahu uhlíku, čím tvrdší materiál tím vyšší obsah uhlíku. V zušlechtěném stavu se dosahuje vysokých hodnot pevnosti [5].

U niklových martenzitických ocelí se většinou vyskytuje nikl (např. 1.4313). Schopnost zakalení zůstává zachována, neprojevují se nepříznivé účinky zvýšeného obsahu uhlíku (vylučování karbidů, vysoký nárůst tvrdostí). Odolnost proti korozi zvýšíme přidáváním molybdenu (1.4418).

Martenzitické ocelí se dodávají v žíhaném stavu, nebo ušlechtilém stavu. Výrobky se dodávají v žíhaném stavu na měkko (jako za studena a za tepla válcovaný pás a jeho dělením vyráběné plechy), mohou být zpracovány tvarováním za tepla nebo za studena (ohýbání, ražení, lisování, tažení), dříve než se provede zušlechtění [5] [31].

Zušlechtění zahrnuje kalení a navazuje na popouštění při teplotě 650-750°C. Popouštěním se sníží pevnost a zvýší se tažnost. Pro lepší odolnost proti korozi se doporučuje přesně dodržovat zadané teploty tepelného zpracování.

Martenzitické korozivzdorné oceli s nízkým obsahem chrom a uhlík mají podobné vlastnosti jako austenitické oceli ale jsou hůře obrobitelné než martenzitické. Nejlepší obrobitelnost martenzitických ocelí má ocel s obsahem 13% chrom a malým obsahem uhlíkem. Čím vyšší obsah chrom tím se obrobitelnost zhoršuje, oceli s vysokým obsahem uhlíku (0,8-1%) působí k tvorbě karbidů velmi abrazivně. Martenzitické oceli většinou obrábíme v žíhaném stavu [10].

Fyzikální vlastnosti martenzitických ocelí

Hlavní fyzikální vlastnosti kalitelných korozivzdorných ocelí se od skupiny jen málo liší. Hustota, součinitel tepelné roztažnosti, modul pružnosti se příliš neliší od hodnot pro polotvrdou nízkolegovanou uhlíkovou ocel. Teplená vodivost je přítomnosti chromu značně snížena. Kalitelné korozivzdorné oceli jsou feromagnetické [9].

Obrobitelnost martenzitických (kalitelných) ocelí.

Obrobitelnost kalitelných korozivzdorných ocelí je úměrná k tvrdosti. Pro zlepšení obrobitelnosti se vyrábějí oceli se zvýšeným obsahem síry 0,15-0,35%. Při lepším oddělování třísky jsou ve struktuře rozptýleny nekovové vměstky sulfidů a selenidů, které zlepšují jakost obrobeného povrchu. Vyšší obsah sulfidů a selenidů zvyšují anizotropii mechanických vlastností. Projevují se snížením plastických vlastností a houževnatosti v příčném směru tváření ve srovnání s podélným směrem tváření. [9].

1.3.5 Austenitické oceli

Austenitické chromniklové oceli s 8% Ni mají příznivou kombinaci zpracovatelnosti, mechanické vlastnosti a odolnosti proti korozi. Používají se pro mnoho účelů a jsou nejvýznamnější skupinou korozivzdorných ocelí. Korozní odolnost je nejdůležitější vlastností austenitických ocelí, která se s narůstajícím obsahem legur zvyšuje. Zvyšování napomáhají zejména chrom a molybden. U feritických a ušlechtilých ocelí je nezbytná jemnozrnná struktura. Konečné zpracování se provádí rozpouštěcím žíháním při teplotách cca 1000-1150°C s následným ochlazením ve vodě a na vzduchu. Austenitické oceli nejsou kalitelné [5].

Pro určité oblasti se požadují austenitické oceli s vyšší pevností. Zvýšení meze průtažnosti je možné dosáhnout například tvářením za studena. Dosáhneme určitých stupňů zpevnění. Austenitické oceli jsou složitější na obrobitelnost než jiné druhy legovaných ocelí. Důvodem složitějších obrábění je s vytvořením nárůstku na čele řezné části nástroje v důsledku sekundární plastické deformace. Vznik otřepů, špatný odvod třísek a horší jakost obrobené plochy. Zpevňování za studena nastává především při přeměně části austenitu na martenzit, protože je materiál vystaven působení vysokých přetvárných sil. Austenit je velmi náchylný ke zpevňování za studena. Při tváření za studena může docházet k doplňkové tvorbě deformačního zpevnění.

Zpevňovací efekt je velmi silný a jeho výsledkem je extrémní tvrdost obrobené plochy. Řezné síly nejsou vyšší, než při obrábění konstrukčních uhlíkových ocelí [10].

Největší účinek vykazují prvky uhlíku (C) a dusíku (N). Dolegováváním dusíkem má v porovnání s uhlíkem výhodu, že zároveň se zlepšováním pevnosti se zlepšuje i korozní odolnost. Dusík obsahuje austenitické oceli s vyššími hodnotami pevnosti např. oceli 1.4311, 1.4318, 1.4406 nebo 1.4439. Zpracování oceli za studena je spojené s deformačním zpevněním.

1.3.6 Austeniticko-feritické oceli

Austeniticko-feritické oceli obsahují 0,02% C a 0,25% N a různý obsah Cr, Ni, Mo. Podíl feritu ve struktuře oceli závisí na chemickém složení, nebo na tepelném zpracování. Teplota zpracování těchto ocelí je cca 1000°C a čím vyšší teplota tím větší obsah feritu [9].

Mechanické vlastnosti austeniticko-feritických ocelí jsou lepší než už u austenitických ocelí. Horší je na tom vrubová houževnatost, protože ferit se stane převažující fází ve struktuře oceli. Korozní odolnost austeniticko-feritických ocelí proti všeobecné korozi je srovnatelná s austenitickými oceli. Čím více chromu tím nižší korozní rychlostí. Austeniticko-feritické oceli mají dobrou odolnost proti koroznímu praskání v prostředích obsahujících chloridy i ve vyšších koncentracích, ale problém nastane v prostředí, kde vznikne atomární vodík. Odolnost proti bodové a štěrbinové korozi je vyšší než u austenitických ocelí a odolnost proti mezikrystalové korozi je dobrá [11].

Austenitické oceli nezaručují bezporuchový provoz a bezpečný provoz, protože může vznikat korozní praskání za napětí. Podíl feritu ve struktuře oceli je dán především feritvorných prvků a pohybuje se mezi 30-50%. Skupina těchto dvoufázových (duplexních) ocelí má některé dříve zmíněné podstatné výhody oproti austenitickým ocelí.

Použití austeniticko-feritických ocelí v chemickém, petrochemickém, papírenském a energetickém průmyslu, nebo v sortiment hutních polotovarů (plechy, trubky). Mohou se používat v prostředí kde přicházejí do styku s mořskou vodou např. chladiče, výměníky tepla [11].

1.4 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je jednou z úchylek, které jsou jako rozdíly skutečného tvaru plochy a tvaru plochy jmenovitého. Úchylky přiřazujeme k hodnotám, které určují mikrogeometrii povrchu obrobené plochy. Další úchylky jsou např. vlnitost, úchylky tvaru a strukturní změny. Úchylky povrchu vznikají v důsledku nedokonalosti a nepřesnosti při výrobě.

Určení výsledné drsnosti povrchu je složitý proces, kterému předchází celá řada úkonů a ovlivňuje je celá řada různých faktorů, které musí být zohledněny. Každý způsob opracování a použité technologie výroby zanechává na povrchu součástky výstupky a hrbolky, které nazýváme nerovnosti povrchu [12].

1.5 Základní charakteristika drsnosti povrchu podle normy

Základní charakteristika drsnosti povrchu podle normy jsou následující:

1. Průměrná aritmetická úchylka Ra
2. Největší výška profilu Rz
3. Průměrná kvadratická úchylka profilu Rq
4. Celková výška profilu Rt
5. Nejvyšší výška výstupku profilu Rp
6. Největší hloubka prohlubně profilu Rv

Průměrná aritmetická úchylka Ra

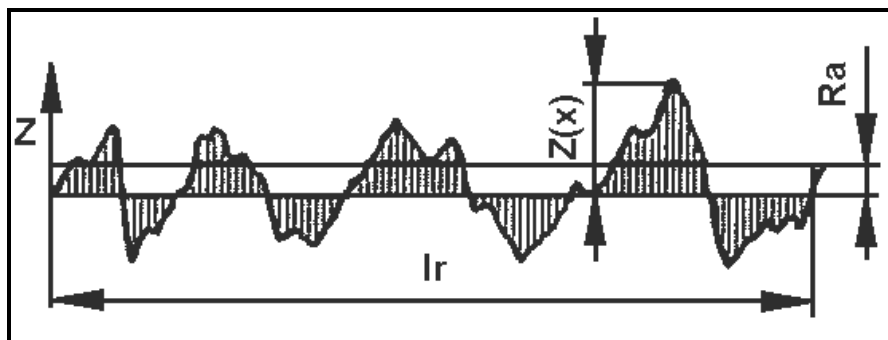
Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r .

Vypovídací schopnost parametru Ra je nízká, Ra nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu. (viz obr. 2) [13].

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

$Z(x)$výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x [μm];

l_rzákladní délka profilu [mm].



Obr. 2 Parametr Ra [13]

Největší výška profilu Rz

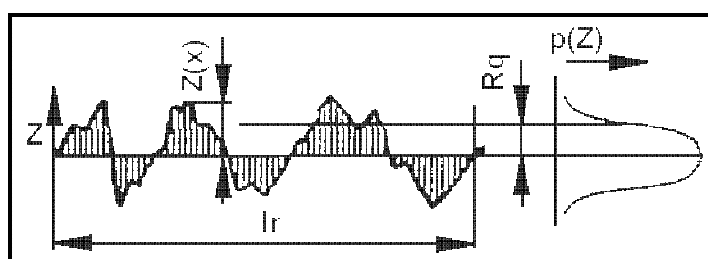
Součet výšky Z_p největšího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu základních délek l_r (viz. obr. 3) [13].

Průměrná kvadratická úchylka profilu Rq

Průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Parametr Rq má význam při statickém pozorování profilu povrchu, neboť zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic (viz obr.3) [13].

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad [\mu m]$$

$Z(x)$výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x [μm].



Obr. 3 Průměrná kvadratická úchylka profilu Rq [13].

Celková výška profilu Rt

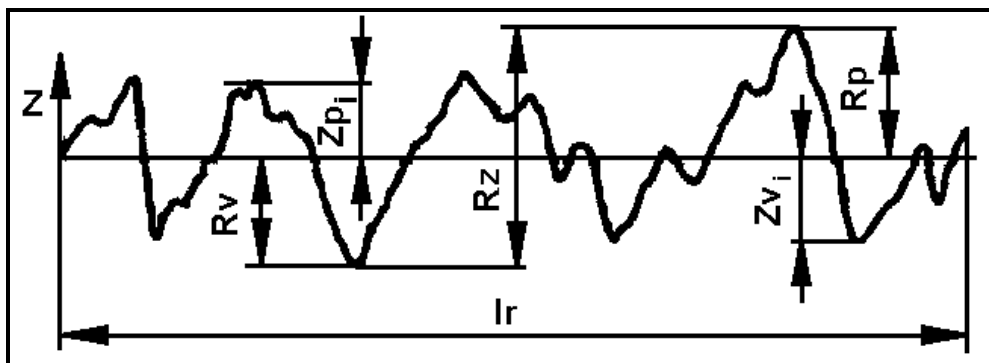
Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky l_n [μm]. Využití parametry Rt , nevychází ze střední čáry a velikost je ovlivněna rýhami, nebo nečistotami na kontrolovaném povrchu.

Nejvyšší výška výstupku profilu R_p

Výška největšího výstupku profilu Z_p v rozsahu základní délky l_r (viz obr. 4) [13].

Největší hloubka prohlubně profilu R_v

Hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r (viz obr. 3) [13].



Obr. 3 Parametry R_p , R_v , R_z [13]

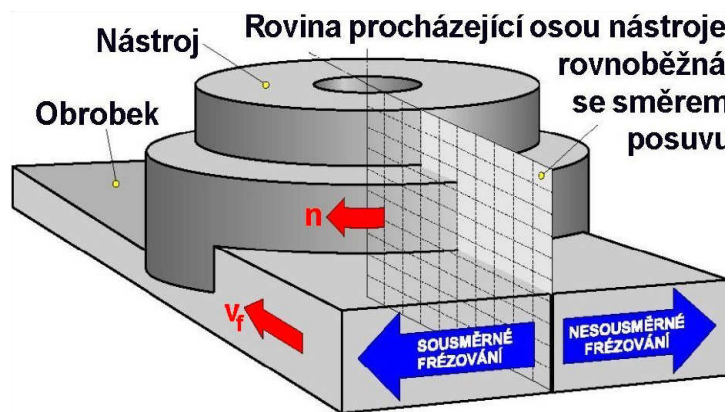
1.6 Frézování

Frézování je třískové obrábění různých součástí, dvou a vícebřitým frézovacím nástrojem. Hlavní řezný pohyb (rotační) vykonává nástroj a vedlejší řezný pohyb (translační) vykonává obrobek na stole stroje, někdy tento pohyb vykonává nástroj (např. konzolové frézy) [12].

Uplatnění frézování je při výrobě rovinných ploch u jednoduchých součástí, ale při obrábění tvarových ploch složitých při dodržení přesnosti rozměru a kvality výrobku.

Frézy jsou více zubové nástroje, během obrábění odebírá každý zub určitou část materiálu ve formě třísky. Zub je v záběru pouze na část otáčky a zbytek běží naprázdno. Proces řezu je přerušovaný, při chodu naprázdno se zub nástroje ochlazuje [14].

Frézování rozlišujeme na válcové (frézování obvodem nástroje) a čelní frézování (frézování čelem nástroje). V diplomové práci se zabýváme čelním frézováním.



Obr. 5 Čelní frézování [15]

Čelní frézování

Čelní frézování se používá při práci s čelními frézami, které mají zuby na obvodě i čele nástroje. Frézovaná plocha se rozděluje na symetrickou (osa nástroje prochází středem frézované plochy) a nesymetrická (osa nástroje je mimo frézované plochy). Čelní frézování má výhodu, protože fréza pracuje současně sousledně i nesousledně. Nástroj koná hlavní pohyb, obrobek koná posunový pohyb a je většinou přímočarý.

$$\text{Řzná rychlost se vypočte: } v_c = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{1000} \quad [m \cdot \min^{-1}] \quad (1)$$

Jednotka posunového pohybu je posuv na zub F_z „délka hrany za kterou ujede obrobek po dobu záběru zubu“

$$\text{Posuv na otáčku: } f_n = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm \cdot \min^{-1}] \quad (2)$$

$$\text{Posunová rychlost: } v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm \cdot \min^{-1}] \quad (3)$$

1.7 Měření řzných sil

Řzné síly umožňují zpřesňovat teorii o řzném procesu. V praxi řzné síly jsou důležité při konstrukci nástrojů, výpočtech, volbě řzných poměrů a konstruování strojů. Řzné síly se měří dynamometrem různých principů a konstrukcí.

Řzná síla působí v zóně řzní a nabývá dynamického jevu tzn. během působení řzného klinu není konstantní. Na začátku řzní roste až po určité maximum, maximum je charakteristické pro moment oddělení elementu třísky od základního materiálu.

Síla poklesne, ale ne na nulovou hodnotu, protože před skončením posunutí elementu začne deformace dalšího elementu. Řeznou sílu vnímáme jako celkovou řeznou sílu.

- **Statická:** průměrná hodnota mezi nejvyššími a nejnižšími špičkami záznamu v době kdy je nástroj v řezném procesu
- **Dynamická:** jde o skutečný obraz velikosti řezné síly zaznamenaný v neustálé změně, která je pro řeznou sílu charakteristická během celého řezného procesu

Musíme rozlišovat celkovou řeznou sílu a řezný odpor. Celkovou řeznou sílu lze rozkládat na složky v souvislosti s několika vlivy řezného procesu, která má všeobecný a neznámý směr. Pak určíme velikost a směr výsledného silového působení. Dynamometry, které jsou založeny na určitých principech umí určit velikost řezné F_c , F_p a F_f . Výslednou sílu F vypočteme ze vztahu (4) [16].

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (4)$$

Síla F_c - řezná síla. Působí ve směru hlavního řezného pohybu, ve směru vektoru řezné rychlosti v_c . U rotačních pohybech určuje velikost krouticího momentu, působí na obrobek a nástroj. Její směr je tangenciální a shodný s vektorem řezné rychlosti v_c [17].

Síla F_f – posunová (axiální) složka řezné síly. Působí ve směru osy obrobku nebo nástroje, rychlost posuvu v_f a nazývá se silou posuvu. Směr nabývá buď axiální, nebo případně jejich kombinace, ale je vždy shodný s vektorem rychlosti posuvu v_f [17].

Síla F_p – pasivní složka řezné síly. Působí radikálně ve směru kolmém k obráběné ploše. Kolmo k vektoru rychlosti v_c a vektoru rychlosti posuvu v_f . Její směr nabývá charakter vždy inverzní ke směru síle posuvu F_f axiálně nebo radiálně případně jejich kombinace, ale je vždy shodný s vektorem rychlosti v_f [17].

Velikost složek řezné síly závisí na řezných parametrech (v_c , a_p , f_z) na geometrii nástroje, obráběný materiál, řezné prostředí a na řezném materiálu. Zvýšili se řezná rychlost v_c se složky řezné síly zmenšují. Měření jednotlivých složek řezných sil je založen na snímání tlaků působících z řezného klínu do experimentálního vzorku. Od tlaků a to síly na plochu se abstrahuje složky řezné síly. Měřicí zařízení pro měření složek řezných sil musí být vysoce citlivá a přesná. Vysoká intenzita je potřebná zejména, když se řezná síla snímá jako dynamický jev v závislosti na rychlosti vzniku a působení [17].

V obrábění se používá k vyjadřování celkových řezných sil, nebo složek empirické vztahy.

$$F_{fn} = C_{F_{fn}} \cdot v_c^{X_{F_{fn}}} \cdot f_z^{Y_{F_{fn}}} \quad [N] \quad (5)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot v_c^{X_{F_f}} \cdot f_z^{Y_{F_f}} \quad [N] \quad (6)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot v_c^{X_{F_p}} \cdot f_z^{Y_{F_p}} \quad [N] \quad (7)$$

Složky řezné síly při frézování

Při frézovacích procesech se během odebrání třísky mění průřez, to vede k značné změně složek řezných sil. Velikost hodnot složek řezných sil závisí na počtu zubů v záběru a od kontinuity délky řezných hran v záběru. Výsledná celková řezná síla je součtem jednotlivých sil, kterými působí na obráběný materiál jednotlivě řezné klíny.

2. NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI

Experimentální část diplomové práce řeší problematiku vyhodnocení vlivu frézovaných korozivzdorných ocelí na kvalitu obrobeného povrchu. Experiment bude opracován na univerzálním 3-osém stroji CNC frézovací centrum HURCO VMX 30t s použitím frézovacích nástrojů od firmy ISCAR. Pro experiment bude zvolena testovaná ocel 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240.

Ze získaných výsledků bude hodnocena drsnost povrchu a měření řezných sil v závislosti na navržených řezných parametrech a použitého řezného nástroje.

Před samotným testováním bude materiál povrchu ofrézován, aby se vymezily nerovnosti zkoušeného materiálu. Zarovnání se provede konvečním frézováním na stroji HURCO VMX 30t.

2.1 Použitý stroj

Pro experiment bylo vybráno univerzální 3 osé CNC frézovací centrum HURCO VMX 30t. Považovaný stroj nám umožní nastavení vysokých otáček vřetene stroje v rozsahu od 10 do 12 000 min^{-1} a rychloposuv v osách X/Y/ Z je 35/35/30 m.min^{-1} .

Frézovací centrum HURCO VMX 30t viz *příloha A*, patří do skupiny mezi vysoce produktivní obráběcí stroje. Typ tohoto frézovací centra se používá pro hrubování a další technologické vlastnosti při nižších investičních nákladech. Stroj zvládne obrovský nárůst síly při vysokých výkonech a rychlostech, je vybaven schopností 3D simulace procesu v reálném čase a programování 3D obrysu. Základním řídicím systémem je Software WINMAX. [18].

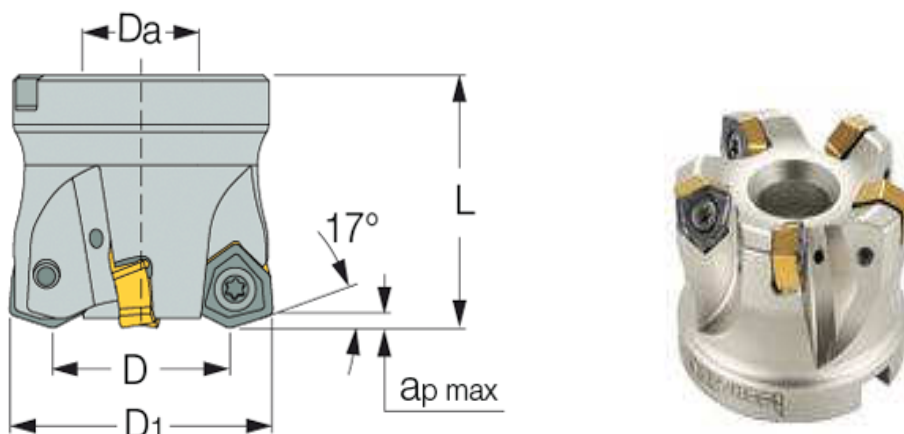
2.2 Použité nástroje

Budou použity frézovací nástroje od společnosti ISCARE s označením FF FWXD050-06-22-05 a vyměnitelná břitová destička „VBD“ s označením FF WOCT 060212T IC928.

Společnost ISCARE již řadu let patří ke světové špičce v oblasti vývoje, výroby a celosvětové distribuce obráběcích nástrojů a řezných materiálů. Uplatnění nachází v nejrůznějších průmyslových odvětvích vyspělých zemích všech kontinentů. Firma se zabývá vysokou kvalitou a výkonností vyráběných nástrojů a řezných materiálů.

Nástroj FF FWXD050-06-22-05

Fréza má šestibřitovou vyměnitelnou destičku o průměru 50 mm. viz *obr. 6* je uvedena katalogová karta frézy FF FWXD050-06-22-05. Fréza FF FWXD050-06-22-05 která byla použita pro laboratorní experiment, je zobrazena na *obr.6* v *tab.2*, jsou uvedeny rozměry používané frézy [19].



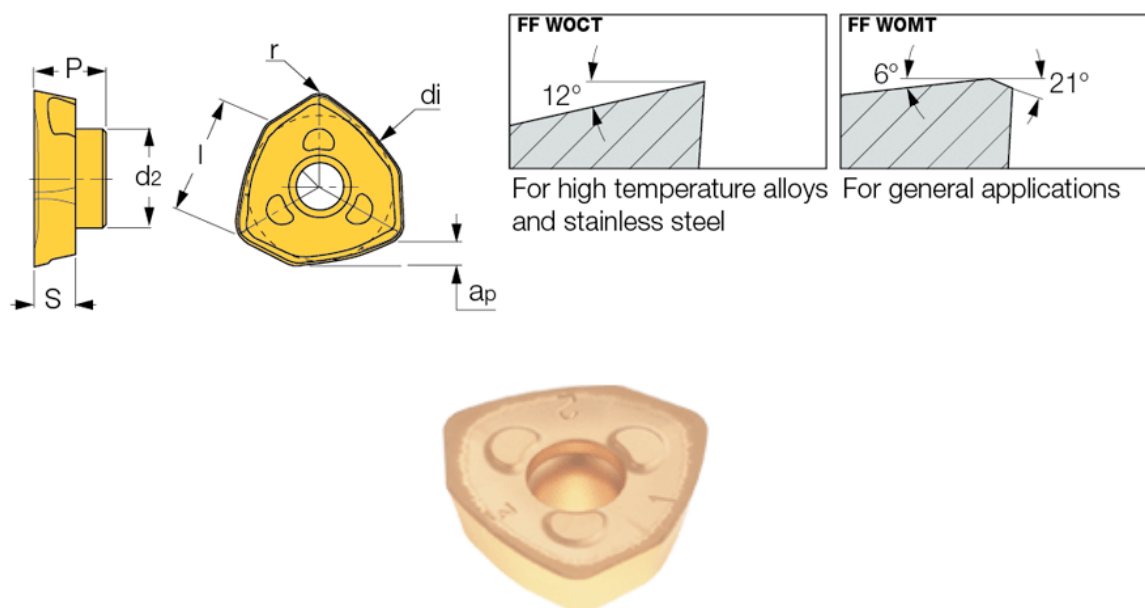
Obr. 6 Fréza FF FWXD050-06-22-05 [19]

Tab. 2 Parametr frézy FF FWXD050-06-22-05 [19]

D_1 [mm]	D [mm]	$AP \text{ MAX}$ [mm]	D_a [mm]	L [mm]	ZU [počet zubů]
50	40	1,0	22	40	5

2.3 Vyměnitelná břitová destička „VBD“ FF WOCT 060212T IC928

Vyměnitelná břitová destička „VBD“ patří do skupiny PVD TiAlN povlakem těžké třídy. Destička se využívá pro frézování nerezové oceli, slitiny vysoké teploty a jiných legovaných ocelí. Doporučení od výrobce je obrábění pro přerušovaný řez a těžkých operací. VBD FF WOCT 060212T IC92 je zobrazena na obr 7 a v tab.3 jsou uvedeny rozměry vyměnitelné břitové destičky [20].



Obr. 7 VBD FF WOCT 060212T IC92 [20]

Tab. 3 Parametry VBD FF WOCT 060212T IC92 [20]

D_i [mm]	l [mm]	a_p [mm]	S [mm]	P [mm]	d_2 [mm]	r [mm]
9,86	7,0	1,0	2,7	4,7	5,6	2,0

Během experimentu nebyla používána procesní kapalina, protože při obrábění korozivzdorných ocelí byla použita vyměnitelná břitová destička, při které se nemusí používat procesní kapalina. Výrobce na vyměnitelnou břitovou destičku nedoporučuje používat procesní kapalinu během obrábění.

2.4 Přístroj pro měření parametrů drsnosti SURFTEST SJ-210

Parametry drsnosti povrchu se měřily na dotykovém měřicím přístroji „drsnoměru SurfTest SJ-210 s označením 178-560-01D od společnosti MITUTOYO“ na Katedře obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB-TUO.

Měřicí přístroj SurfTest SJ-210 je velmi snadno použitelný nástroj pro měření drsnosti povrchu, který umí zobrazit drsnost povrchu pomocí barevného LCD displeje. Zařízení SurfTest SJ-210 je dotykový (hrotový) přístroj pro měření drsnosti povrchů. Použití přístroje je nejčastěji v dílenských prostorách.

Přístroj SJ-210 má dobře čitelný 2,4“ barevný grafický displej, výsledky naměřené drsnosti povrchu jsou zobrazovány barevně. Hodnocený profil, křivka dosedací plochy amplitudy distribuční křivky jsou zobrazeny vedle výsledků výpočtů. Naměřené hodnoty mohou být přenášeny do počítače přes vysokorychlostní rozhraní USB, nebo ukládány na kartu Micro SD. Zobrazovací jednotka podporuje 16 jazyků a další parametry různých národních a mezinárodních norem. V měření je použit snímací dotek, který má profil snímacího hrotu 2 μm a měřicí síla 0,75 Nm.

Technické parametry drsnoměru SurfTest SJ-210 [21]

Model funkcí	Parametry
Měřicí rozsah osy X (posuv)	17,5 mm
Měřicí rozsah osy Z (zdvih)	360 μm (-200 μm až +160 μm)
Rychlost měření	0,25; 0,5; 0,75 mm.s^{-1}
Návrat měření	1 mm.s^{-1}
Přítlačná síla	Méně než 400 mN
Provozní teplota	5 °C až 35 °C
Relativní vlhkost	80-85 %
Výstup dat	SB I/F, Výstup Digimatic, Výstup tiskárny, RS-232C I/F. Vstup pro nožní snímač

Základní parametry měření:

- základní délka profilu (cut off délka) $l_r = 0,08; 0,25; 0,8; 2,5 \text{ mm}$
- vyhodnocovaná délka profilu $l_n = 2,5; 8 \text{ mm}$
- rychlost snímání: $0,5 \text{ mm.s}^{-1}$
- filtr: Gaussův



Obr. 8 Měřicí přístroj SurfTest SJ-210 pro měření drsnosti povrchu [21]

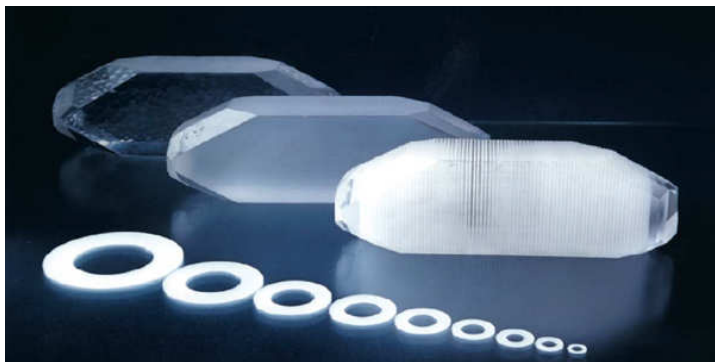
2.5 Dynamometr KISTLER typ 9255B

Řezné síly při čelním frézování byly měřeny pomocí piezoelektrický dynamometr KISTLER typ 9255B. Moderní dynamometr je využit při generování elektrického náboje přímo deformováním činidla. Takovou vlastnost mají některé krystaly, které se nazývají piezoelektrický jev (z řeckého slova piezein = tlačit). Deformovaný krystal je schopný produkovat elektrický náboj, nebo nastane opačný jev, kdy se krystal v elektrickém napětí deformuje.



Obr. 9 Trojsložkový piezoelektrický dynamometr KISTLER typ 9255B [22]

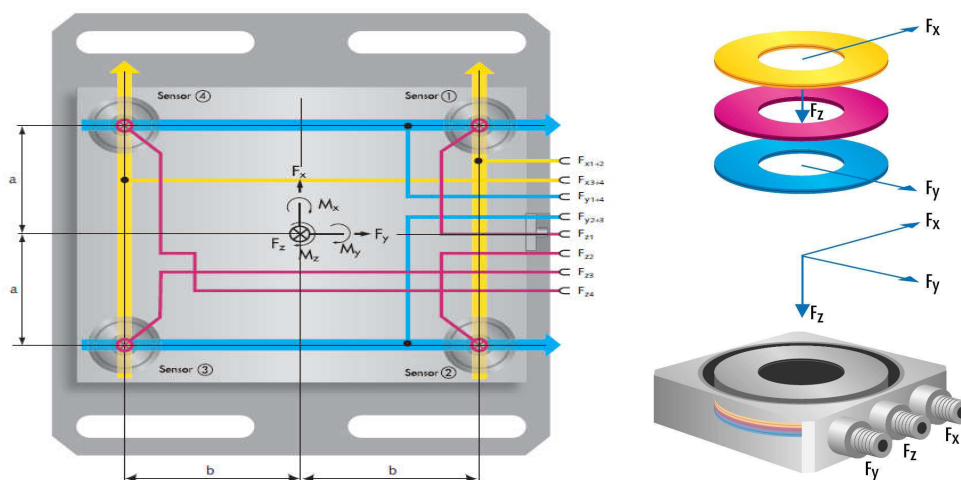
Dynamometr uvedeného typu se využívá pro snímání deformace piezoelektrického jevu. Je charakterizován vznikem elektrického náboje na povrchu krystalů při mechanickém zatížení. Nejvíce využívaný piezoelektrický materiál je křemen a materiály na bázi titaničitanu barnatého, nebo Seignettovy soli. Velikost náboje při zatěžování je přímo úměrná velikosti působící síly a s poklesem zatížení se lineárně snižuje, až úplně vymizí při nulovém zatížení [23].



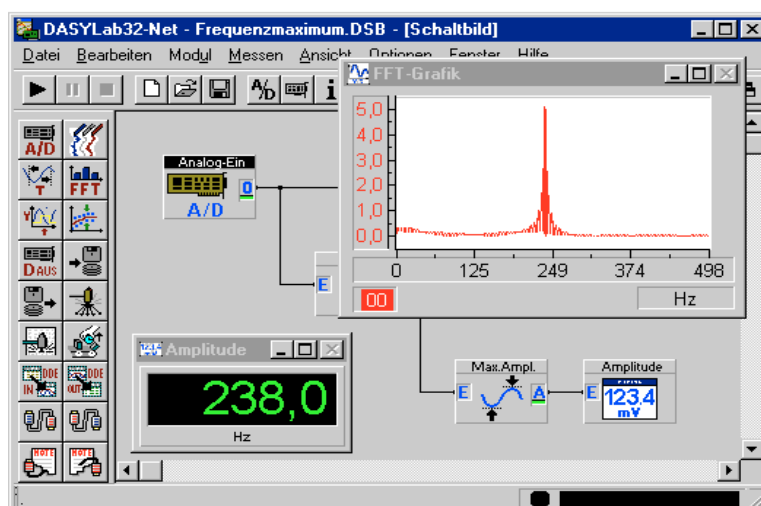
Obr. 10 Nařezané destičky (např. Si) pro budoucí čidla [23]

Samotné napětí je vedeno měřicím kabelem a následně zpracovávány zesilovacím zařízením KISTLER typ 5006, z kterého výstupem byl milivoltalické napětí, které je zpracováno analogovým digitálním převodníkem Adventech PCL 818-HG.

Celé měření je znázorněno na obr.11 a měřicí systém je schopný zaznamenávat tři složky řezné síly v kartézském systému X, Y, a Z. Systém umí zaznamenávat síly ve směru F_x , F_y , a F_z které odpovídají silám F_{fn} , F_f a F_p . Samotný výstup z převodníku byl zpracovaný softwarově pomocí Dasy Lab verze 3.5 viz. obr.12.



Obr. 11 Trojsložkový piezoelektrický dynamometr F_x , F_y , F_z a uspořádání prstenců krystalů [23]



Obr. 12 Softwarově pomocí Dasy Lab verze 3.5 [17]

2.6 Vzorek materiálu

V experimentální části byl použit materiál oceli 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240. Uvedený typ oceli patří do kategorie austenitická chromniklová nerezová ocel X5CrNi18-10. Má vynikající odolnosti proti korozi a oxidaci, která odolává teplotám do 350°C. Značí se dle AISI 340, nebo podle ČSN 17 240 a podle DIN 1.4301. Je odolná proti korozi v prostředí běžného typu (voda, slabé alkálie, slabé kyseliny, průmyslové a velkoměstské atmosféry). Velká tvrdost materiálu zajistí větší bezpečnost proti mechanickému poškození jak při výrobě, tak při výrobě samotné práci.

Ocel je svařitelná, ale v oblasti svaru náchylná k mezikrystalové korozi. U průvaru musíme nad 5mm žíhat svařenec. Ocel se zpracovává ve stříháním, ohýbáním, tažením a třísková obrobiteľnosť je dobrá. Použití oceli u gastronomická zařízení, vnější konstrukce, vodárny, extrémní vodárny, zařízení ČOV a mimo svařovaných konstrukcí s provařením přes 5 mm průvaru. U konstrukcích po svaření musíme nutně žíhat s následným tryskáním a mořením. Je cenově mírně dražší, ale má 10 krát vyšší životnost při tisku proti ostatním materiálům a kolmější hrany k ploše, protože se podleptává o poloviční hodnoty než barevné kovy [24] [30].

V následujících tab. 4 jsou uvedeny chemické vlastnosti složení oceli, a tab. 5 jsou uvedeny mechanické vlastnosti oceli [25].

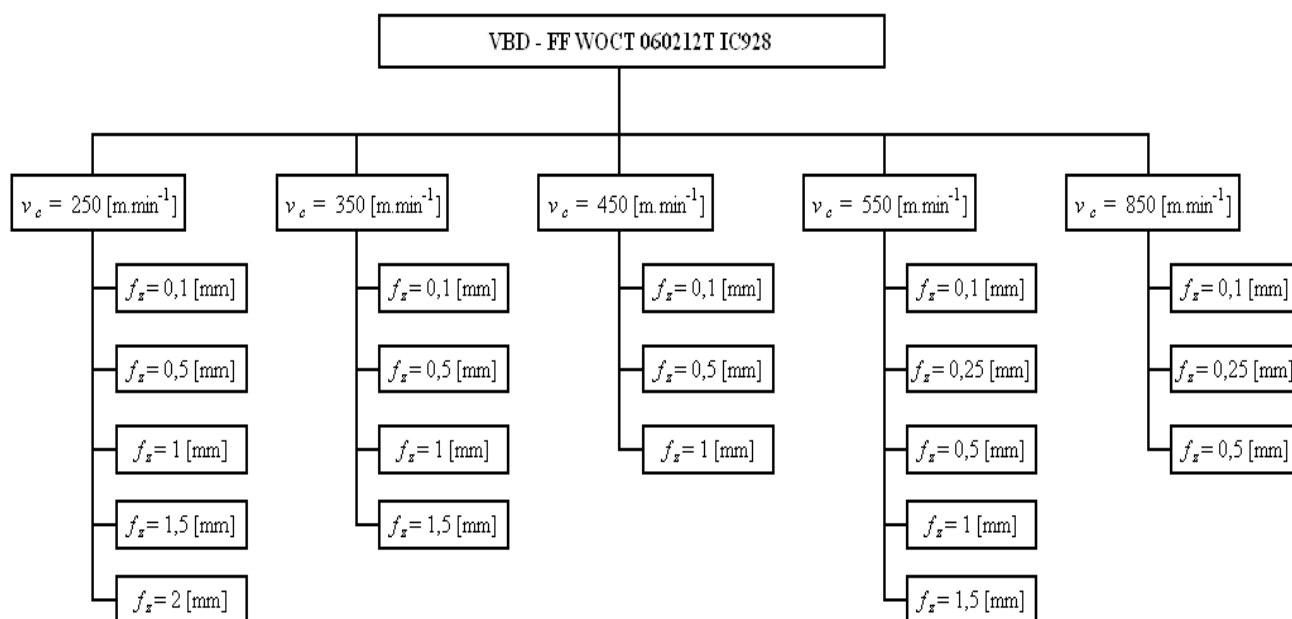
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240

Obsah prvků	C	Si	Mn	P	Ni	S	Cr	N
[%]	0,06	0,49	1,04	0,026	8,02 10,5	0,004	18,15	0,05

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240

Mechanické vlastnosti	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [N/mm ²]	A5 [%]	Tvrdość Vickers [HV]	E [MPa]
1.4301 (X5CrNi18-10)	210	520 - 720	50	404-414	199

Následující uvedený diagram popisuje návrh opracování experimentu pro frézování korozivzdorných ocelí na frézovacím centru HURCO VMX 30t pro danou ocel 1.4301 ČSN 17 240. Na navržených vzorcích materiálu hodnocena kvalita povrchu po obrobení. Budou sledovány parametry drsnosti povrchu v příčném a podélném řezu pomocí zařízení drsnoměru Surftest SJ-210 a na měřené řezné síly pomocí zařízení dynamometru Kistler typ 9255.



Obr. 13 Schéma rozsahu experimentu

2.7 Řezné podmínky pro daný experiment

Při experimentální části byly nastaveny řezné podmínky pro čelní sousledné frézování na stroji HURCO VMX 30t. Nastavené řezné parametry pro zvolené navržené vzorky materiálu jsou uvedeny v následující tab. 6.

Tab. 6 Řezné parametry použité při experimentu

Označení materiálu	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet zubů frézy z	Katalogové označení frézy [-]
Ocel 1.4301	0,5	0,1÷0,2	50	5	FF FWXD050-06-22-05

Pro navržené vzorky materiálu, byly použity následující rychlosti posuvu na zub f_z [m.min⁻¹] při daných řezných rychlostech v_c [m.min⁻¹] uvedené v tab. 7, 8. Byla spočítána rychlost posuvu v_f [m.min⁻¹] a otáčky n [min⁻¹], pro frézu s průměrem 50 mm pomocí vzorců (8, 9). Vypočtené hodnoty řezné rychlosti jsou uvedeny v tab. 7, 8.

Tab. 7 Posuv na zub f_z [mm], řezná rychlost $v_c = 250$ až 450 [m.min⁻¹], otáčky n [min⁻¹], rychlost posuvu v_f [m.min⁻¹] pro frézu s průměrem $D_1 = 50$ mm

Posuv na zub f_z [mm]	$v_c = 250$ [m.min ⁻¹] $n = 1\,592$ [min ⁻¹]	$v_c = 350$ [m.min ⁻¹] $n = 2\,228$ [min ⁻¹]	$v_c = 450$ [m.min ⁻¹] $n = 2\,865$ [min ⁻¹]
	v_f [m.min ⁻¹]	v_f [m.min ⁻¹]	v_f [m.min ⁻¹]
0,1	0,8	1,11	1,43
0,5	3,98	5,57	7,16
1	7,96	11,14	14,32
1,5	11,94	16,71	21,49
2	15,92	-----	-----

Tab.8 Posuv na zub f_z [mm], řezná rychlost $v_c = 550$ až 850 [m.min⁻¹], otáčky n [min⁻¹], rychlost posuvu v_f [m.min⁻¹] pro frézu s průměrem $D_1 = 50$ mm

Posuv na zub f_z [mm]	$v_c = 550$ [m.min ⁻¹] $n = 3\,501$ [min ⁻¹]	$v_c = 850$ [m.min ⁻¹] $n = 5\,411$ [min ⁻¹]
	v_f [m.min ⁻¹]	v_f [m.min ⁻¹]
0,1	1,75	2,71
0,25	4,38	6,76
0,5	8,75	13,53
1	17,51	-----
1,5	26,26	-----

Znázorněný příklad výpočtu pro rychlost posuvu

Materiál 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240 fréza typu FF FWXD050-06-22-05, ($z = 5$ zubů frézy, $D_1 = 50$ mm), jsou použité řezné parametry při experimentu, posuv na zub $f_z = 0,1$ mm, řezná rychlost $v_c = 250$ m.min⁻¹.

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (8)$$

$$v_f = 0,1 \cdot 5 \cdot 1\,591,549$$

$$\underline{\underline{v_f = 795,77 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}] = 0,795 \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}]}}$$

Znázorněný příklad výpočtu pro otáčky

Otáčky n při frézování korozivzdorných oceli pro průměr frézy $D_1 = 50$ mm a řezná rychlost $v_c = 250$ m.min⁻¹ se vypočítají stejně jako u konvenčního frézování ze vztahu.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (9)$$

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_1}$$

$$n = \frac{250 \cdot 1000}{\pi \cdot 50}$$

$$\underline{\underline{n = 1\,592 \text{ [min}^{-1}]}}$$

3. REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOSTI

Experimentální činnost byla provedena podle návrhu experimentu za spolupráce Žilinské univerzity v Žilině na Katedře obrábění a výrobní techniky Strojírenské fakulty. Materiál, který byl použit v experimentální činnosti byla ocel 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240. Experiment se prováděl na stroji HURCO VMX 30t s použitím nástroje a vyměnitelných břitových destiček od firmy ISCARE. Před samotným testováním povrchu a měření sil byl frézovaný materiál zarovnán frézováním na stroji HURCO VMX 30t.

Tab. 9 Použité řezné parametry při experimentu pro ocel 1.4301, fréza s $\varnothing D_1 = 50$ [mm]

Plocha číslo	Posuv na zub f_z [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]
1	0,1	250	1 592	0,8
2	0,5			3,98
3	1			7,96
4	1,5			11,94
5	2			15,92
6	0,1	350	2 228	1,11
7	0,5			5,57
8	1			11,14
9	1,5			16,71
10	0,1	450	2 865	1,43
11	0,5			7,16
12	1			14,32
13	1,5			21,49
14	0,1	550	3 501	1,75
15	0,25			4,38
16	0,5			8,75
17	1			17,51
18	1,5			26,26
19	0,1	850	5 411	2,71
20	0,25			6,76
21	0,5			13,53

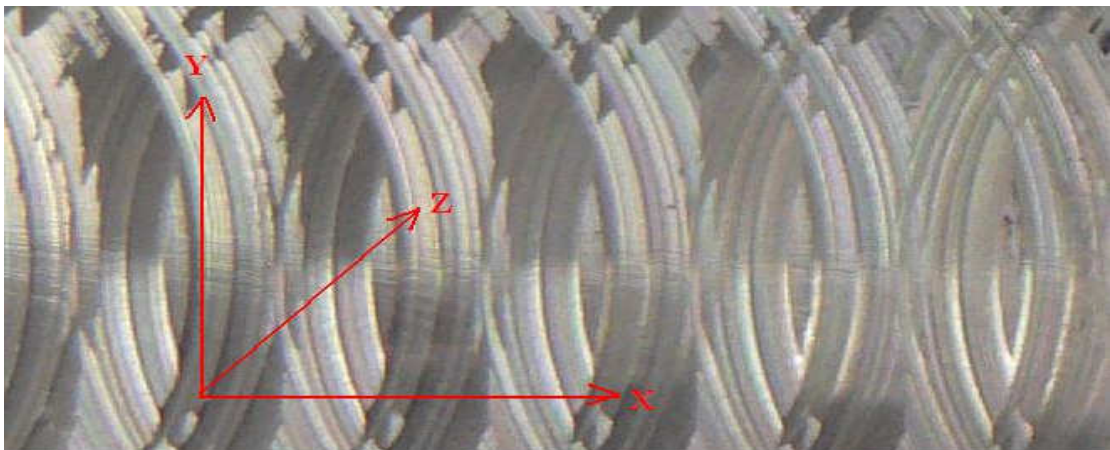
4. MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Zpracování a vyhodnocení naměřených výsledků drsnosti povrchu byl použit software SJ-Tools. Program Microsoft Office „Excel“ slouží k vyhodnocení dat, řízení přístroje a archivaci naměřených dat.

Měření složek řezných sil při frézování zajistil tří složkový dynamometr typu Kistler 9255 a zesilovač náboje Kistler 5006. Výstupem bylo milivoltalické napětí, které se zpracovává na analogově-digitální převodník Adventech PCL 818-HG. Výstupy z převodníku byly zpracovány softwarově pomocí Dasy Lab verze 3.5.

4.1 Naměřená data a vyhodnocení výsledku drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo provedeno pomocí přístroje SURFTEST SJ-210 a dotykový hrot zaznamenává drobné nepravidelnosti povrchu měřeného zkušebního vzorku.



Obr. 14 Opracovaný materiál ocel 1.4301 pro měření parametrů drsnosti povrchu

Drsnost povrchu vzorků bude měřena 10 krát ve dvou směrech, podélném směru „směr posuvu frézování (osa x)“ a v příčném směru „směr frézování (osa y)“ [26].

Značení pro jednotlivá měření parametrů drsnosti povrchu

Označení jednotlivých měření parametrů drsnosti povrchu byl navržen rozlišovací systém. „druh materiálu, počet břitů frézy, řezná rychlost v_c , posuv na zub f_z , směr měření, číslo měření“

00 - 0 - R - Z - X 11

00 označení materiálu ocel 1.4301 (X5CrNi18-10)

0 5-ti břitová fréza

R řezná rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

Z posuv na zub f_z [mm]

X směr měření: A - ve směru osy x

B - ve směru osy y

11 číslo měření

Tabulky naměřených hodnot parametru drsnosti povrchu

Pro ocel 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240 jsou v tab.10 uvedeny hodnoty drsnosti povrchu. Označení vzorku je 1.4301_5_250_0,1A1

Byla použita 5-ti břitová fréza, řezná rychlost $v_c = 250$ [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$], posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm] a vypočtená řezná rychlost posuvu $v_f = 0,8$ [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]. Měření se realizovalo ve směru osy x, číslo měření 1.

Tab. 10 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu vzorek 1.4301-5-250-0,1A1

Číslo měření i	Označení měření x_i	Měřené parametry drsnosti povrchu		
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
1	1.4301-5-250-0,1A1	2,58	11,71	2,86
2	1.4301-5-250-0,1A2	2,31	11,40	2,66
3	1.4301-5-250-0,1A3	3,28	13,40	3,67
4	1.4301-5-250-0,1A4	2,85	13,04	3,28
5	1.4301-5-250-0,1A5	2,37	11,65	2,12
6	1.4301-5-250-0,1A6	2,08	11,39	2,40
7	1.4301-5-250-0,1A7	3,40	13,55	3,84
8	1.4301-5-250-0,1A8	2,63	12,56	3,06
9	1.4301-5-250-0,1A9	3,26	13,59	4,26
10	1.4301-5-250-0,1A10	3,10	13,67	3,63
Součet naměřených hodnot $\sum_{i=1}^n x_i$		27,84	125,96	31,77
Arit. průměr hodnot $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$		2,78	12,60	3,18

4.2 Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou

Po naměření hodnot byla provedena kontrola na hrubé chyby, které mohly vzniknout při samotném měření. Hrubé chyby, které vznikají nesprávným měření, vadou přístroje, nesprávným odečtením hodnot, nesprávnou manipulací s měřidlem, musí být ze souboru naměřených hodnot vyloučeny. Uvedené vzorce jsou použity z literatury [13].

Postup pro zjišťování hrubé chyby [13]:

1. ze souboru naměřených hodnot $x_1 < x_2 \dots < x_n$ se vypočítá jejich hodnota \bar{x} - průměrná hodnota,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ kde} \quad (10)$$

x_i naměřené hodnoty veličiny;

n počet měření.

Příklad výpočtu střední hodnoty \bar{x} (uvedené hodnoty jsou z tab.10)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{27,84}{10} = \underline{\underline{2,784 \text{ } [\mu m]}}$$

a výběrová směrodatná odchylka $s(x)$:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \text{ kde} \quad (11)$$

x_i naměřené hodnoty veličiny;

\bar{x} průměrná hodnota;

n počet měření.

Příklad výpočtu výběrové směrodatné odchylky $s(x)$

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1,9154}{10-1}} = \underline{\underline{0,4613 \text{ } [\mu m]}}$$

2. Pro posouzení odlehlosti podezřelých hodnot souboru (x_2, x_n) se vypočítají normované hodnoty H_2, H_n :

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad \text{popřípadě} \quad H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)}, \text{ kde} \quad (12)$$

x_i naměřené hodnoty veličiny;

\bar{x} průměrná hodnota;

$s(x)$ výběrová směrodatná odchylka;

n počet měření.

3. Z tabulek se určí mezní hodnota H pro předem stanovenou pravděpodobnost p a počet měření n v souboru n . Mezní hodnota H pro pravděpodobnost $p=95\%$ a pro počet měření $n = 10$ je $H = 2,18$.

Za předpokladu, že $H_2 < H$ a $H_n < H$ hodnota x_2 není zatížena hrubou chybou a ponechává se v souboru, ale hodnota x_n je ovlivněna chybou a ze souboru naměřených hodnot se vyloučí [13].

Příklad výpočtu normované hodnoty H_2

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} = \frac{2,784 - 2,31}{0,4613} = \underline{\underline{1,0346}}$$

vypočtená hodnota $H_2 < 2,18$, pak hodnota x_2 není zatížena hrubou chybou, která se nechá v souboru při vyhodnocení hodnot měření.

4.3 Nejistoty měření

Při stanovení nejistot měření, byla stanovena pro každý měřený povrch drsnosti standardní nejistota typu A (u_A), standardní nejistota typu B (u_B) a kombinovaná nejistota (u_C).

Standardní nejistota typu A (u_A) se zjistí výpočtem směrodatné odchylky $s(\bar{x})$ je dána vztahem (13) [13].

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \text{ kde} \quad (13)$$

$s(\bar{x})$ směrodatná odchylka;

x_i naměřené hodnoty veličiny;

\bar{x} průměrná hodnota výběru;

n počet měření.

Příklad výpočtu nejistoty měření - standardní nejistota typu A (u_A):

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{1,9154}{10 \cdot (10-1)}} = \underline{\underline{0,1459 \text{ } [\mu\text{m}]}}$$

Nejistota je získaná z opakovaného měření, hodnota s počtem měření klesá. Po případ malého počtu měření $n < 10$ je hodnota určená pomocí vztahu (13) málo spolehlivá. Nejistotu typu A doplníme nejistotou typu B.

Standardní nejistota typu B (u_B) je hodnota nezávislá na počtu měření. Ovlivňuje především prostředí měření (teplota, vlhkost, vibrace), měřený objekt (hodnota a typ odchylky tvaru, vlnitost, drsnost, materiál), obsluha měřicího zařízení (nastavení hrotu, vliv opěrné patky snímacího přístroje) [27].

Standardní nejistoty typu B (u_B) je dána vztahem (14)

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}, \text{ kde} \quad (14)$$

u_{B1} nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu;

u_{B2} nejistota měřicího přístroje.

Hodnota nejistoty vlivu opěrné patky snímacího hrotu u_{B1} byla stanovena pro rovnoměrné pravoúhlé rozdělení hustoty pravděpodobnosti (tzn. výskyt kterékoliv hodnoty z intervalu omezeného chybou je stejně pravděpodobný) vztahem [28].

$$u_{B1} = \frac{z_{1 \max}}{k}, \text{ kde} \quad (15)$$

$z_{1 \max}$ maximální odchylka j-tého zdroje nejistoty vlivu opěrné patky, hodnota byla stanovena na úrovni $\pm 3\%$ z naměřené hodnoty pro daný měřicí přístroj; k součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí, takže např. pro normální je $k = 2$, pro rovnoměrné $k = \sqrt{3}$.

Hodnota nejistoty měřicího přístroje u_{B2} byla stanovena na úrovni $\pm 3\%$ z naměřené hodnoty pro daný měřicí přístroj [29].

Příklad výpočtu nejistoty měření

- Standardní nejistoty typu B (u_B)
- Nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu u_{B1}
- Nejistota měřicího přístroje u_{B2}

$$u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{k}$$

$$u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03$$

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}$$

$$u_{B1} = \frac{2,784 \cdot 0,03}{\sqrt{3}}$$

$$u_{B2} = 2,784 \cdot 0,03$$

$$u_B = \sqrt{0,0482^2 + 0,0835^2}$$

$$u_{B1} = 0,0482 \text{ } [\mu m]$$

$$u_{B2} = 0,0835 \text{ } [\mu m]$$

$$\underline{\underline{u_B = 0,0965 \text{ } [\mu m]}}$$

Kombinovaná standardní nejistota (u_c) je dána vztahem (16) [27].

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \text{ kde} \quad (16)$$

u_A standardní nejistota typu A;

u_B standardní nejistota typu B.

Příklad výpočtu nejistoty měření - kombinovaná standardní nejistota (u_C):

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$u_C = \sqrt{0,1459^2 + 0,0965^2}$$

$$\underline{\underline{u_C = 0,1749 \text{ } [\mu m]}}$$

Rozšířená kombinovaná nejistota U_C je dána vztahem (17) [27].

$$U_C = k_u \cdot u_C, \text{ kde} \quad (17)$$

u_C kombinovaná standardní nejistota;

k_u koeficient rozšíření (pokrytí), byl stanoven $k_u = 2$.

Pro rozdělení se koeficient rozšíření $k = 2$ odpovídá úrovni spolehlivosti přibližně 95%.

Příklad výpočtu nejistoty měření - rozšířená kombinovaná nejistota U_C

$$U_C = k_u \cdot u_C$$

$$U_C = 2 \cdot 0,1749$$

$$\underline{\underline{U_C = 0,349 \text{ } [\mu m]}}$$

4.4 Vyhodnocení naměřených dat parametrů drsnosti povrchu

Během měření drsnosti povrchu v experimentu se sledovaly parametry drsnosti povrchu Ra , Rz a Rq v podélném směru „osa x“ a v příčném směru „osa y“. Parametr drsnosti Ra je průměrná aritmetická úchylka profilu a nejčastěji se používá pro hodnocení kritérii drsnosti povrchu „střední aritmetická hodnota absolutních hodnot pořadnic v rozsahu základní délky“. Parametr Rz je nejvyšší výška nerovnosti profilu. Výšková charakteristika drsnosti povrchu, která určuje vzdálenost mezi prohlubni profilu v rozsahu základní délky. Parametr Rq je průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu. Využití parametru Rq při statickém pozorování profilu povrchu, odpovídá standardní odchylce z profilových pořadnic.

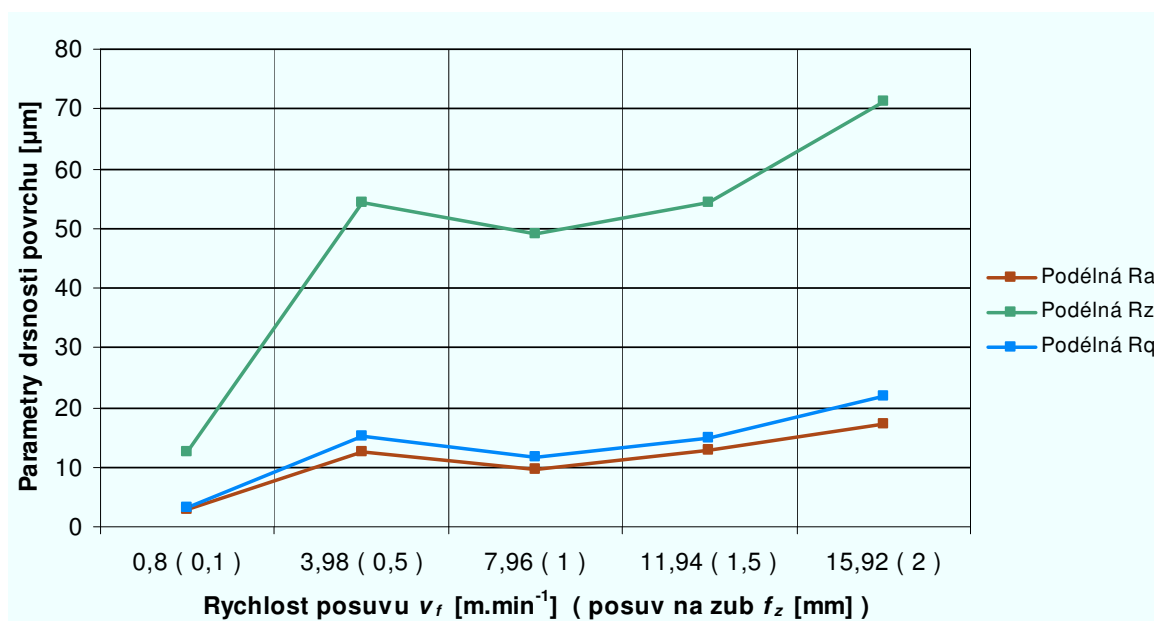
V realizaci experimentální části jsou naměřené výsledky znázorněné v tabulkách a grafech a také jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty sledovaných parametrů drsnosti povrchů a pro materiál 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240, při použití 5-ti zubového nástroje. V příloze B jsou sledované parametry drsnosti povrchu v příčném a podélném směru měření. V tabulkách a grafech jsou naměřené a vypočtené hodnoty pro použitou ocel 1.4301 ČSN 17 240 při použití 5-ti břitového nástroje.

4.4.1 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu – ocel 1.4301 ČSN 17 240, osa „x“

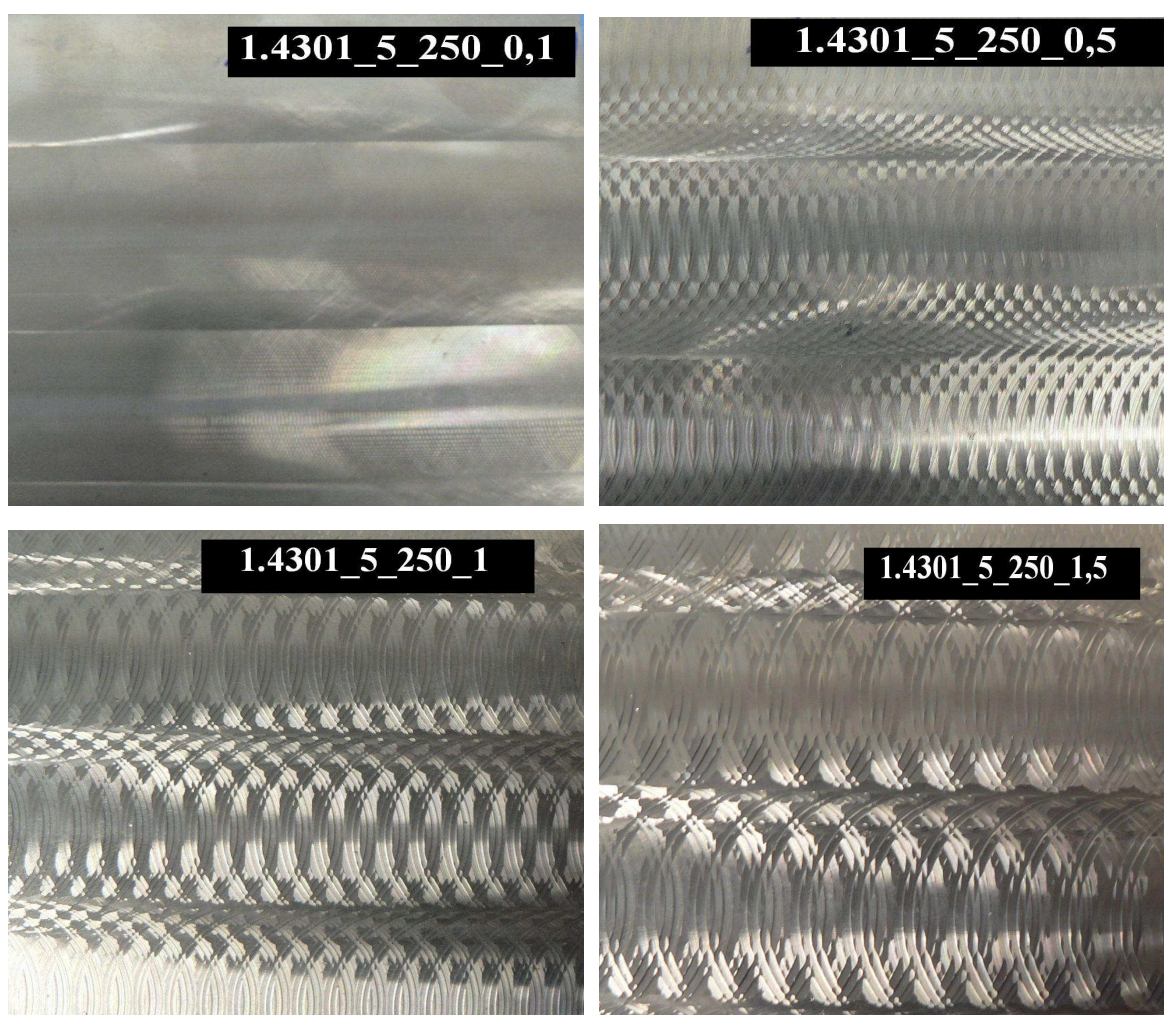
Tab. 11 Vypočtené průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu

- Řezná rychlost $v_c = 250$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 0,1 \div 2$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 0,8 \div 15,92$ [m.min⁻¹]. Použité řezné parametry viz. tab. 9

Plocha č.	Značení průměru naměřených hodnot \bar{x}	Měřené parametry drsnosti povrchu - podélné „osa x“		
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
1	1.4301-5-250-0,1A	2,78	12,6	3,18
2	1.4301-5-250-0,5A	12,49	54,28	15,13
3	1.4301-5-250-1A	9,51	49,10	11,55
4	1.4301-5-250-1,5A	12,74	54,38	14,91
5	1.4301-5-250-2A	17,32	74,47	21,76



Graf 1 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu, řezná rychlost $v_c = 250$ [m.min⁻¹] a měřené plochy ve směru osy „x“.



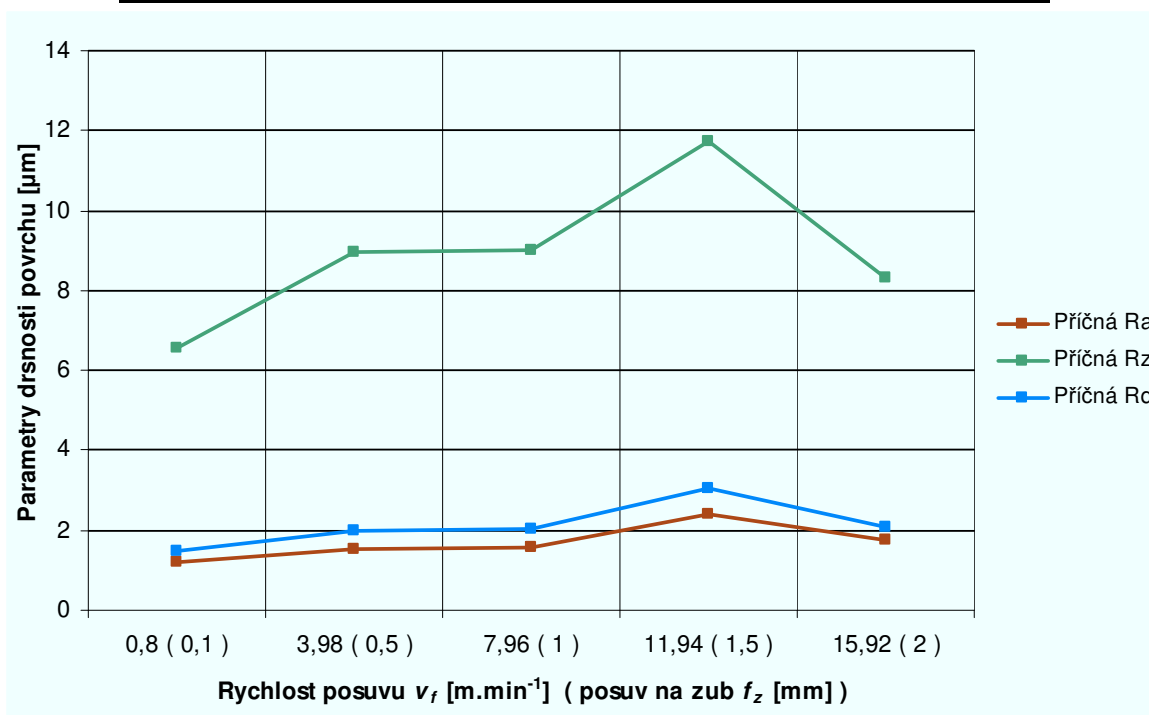
Obr. 15 Opracované plochy č.1-5, ocel 1.4301 při řezné rychlosti $v_c = 250$ [m.min⁻¹].

4.4.2 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu – ocel 1.4301 ČSN 17 240, osa „y“

Tab. 12 Vypočtené průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu

- Řezná rychlost $v_c = 250 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, posuv na zub $f_z = 0,1 \div 2 \text{ [mm]}$ a rychlost posuvu $v_f = 0,8 \div 15,92 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$. Použité řezné parametry viz. tab. 9

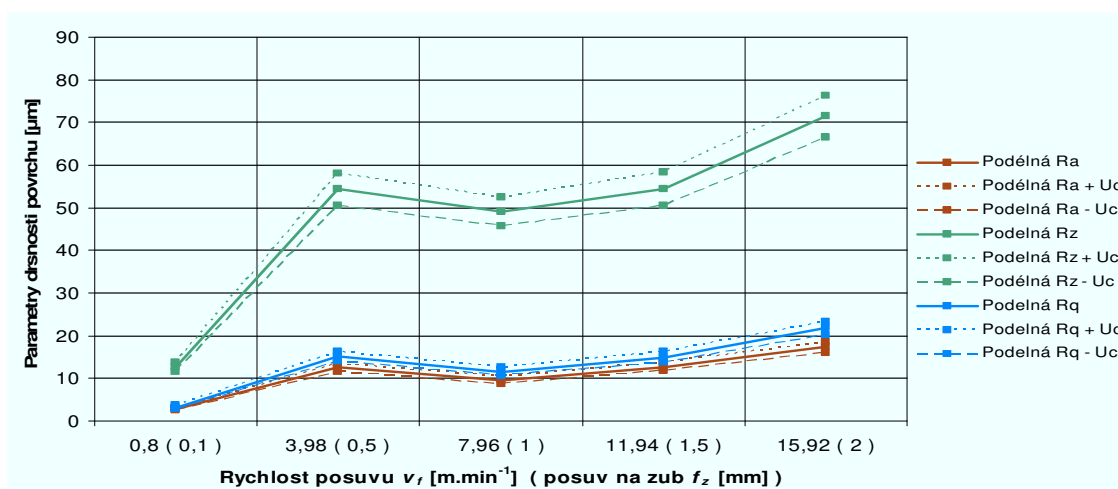
Plocha č.	Značení průměru naměřených hodnot \bar{x}	Měřené parametry drsnosti povrchu - příčná „osa y“		
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
1	1.4301-5-250-0,1B	1,19	6,54	1,49
2	1.4301-5-250-0,5B	1,50	8,96	1,97
3	1.4301-5-250-1B	1,58	9,00	2,05
4	1.4301-5-250-1,5B	2,40	11,74	3,03
5	1.4301-5-250-2B	1,77	8,30	2,08



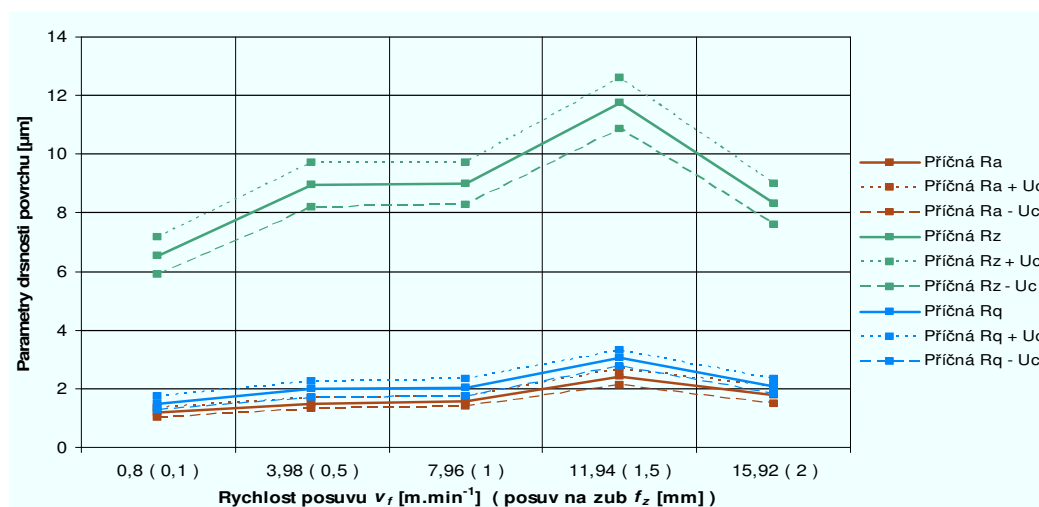
Graf 2 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu, řezná rychlost $v_c = 250 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a měřené plochy ve směru osy „y“.

Tab. 13 Vypočtené průměrné hodnoty parametrů drsnosti povrchu Ra , Rz a Rq ve směru osy „x“, označení materiálu je ocel 1.4301 ČSN 17 240, řezná rychlost $v_c = 250 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, posuv na zub $f_z = 0,1 - 2 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a rozšířená kombinovaná nejistota.

Plocha č.	Posuv na zub f_z [mm]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Měřené parametry drsnosti povrchu - podélné „osa x“			Měřené parametry drsnosti povrchu - příčná „osa y“		
			Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
1	0,1	0,8	$2,78 \pm 0,35$	$12,6 \pm 1,07$	$3,18 \pm 0,48$	$1,19 \pm 0,18$	$6,54 \pm 0,65$	$1,49 \pm 0,23$
2	0,5	3,98	$12,49 \pm 0,89$	$54,28 \pm 3,82$	$15,13 \pm 1,08$	$1,50 \pm 0,21$	$8,96 \pm 0,77$	$1,97 \pm 0,27$
3	1	7,96	$9,51 \pm 0,80$	$49,10 \pm 3,47$	$11,55 \pm 0,95$	$1,58 \pm 0,18$	$9,00 \pm 0,72$	$2,05 \pm 0,31$
4	1,5	11,94	$12,74 \pm 1,00$	$54,38 \pm 3,80$	$14,91 \pm 1,22$	$2,40 \pm 0,26$	$11,74 \pm 0,87$	$3,03 \pm 0,27$
5	2	15,92	$17,32 \pm 1,32$	$74,47 \pm 5,17$	$21,76 \pm 1,64$	$1,77 \pm 0,29$	$8,30 \pm 0,70$	$2,08 \pm 0,25$



Graf 3 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu, řezná rychlost $v_c = 250 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a měřené plochy ve směru osy „x“.



Graf 4 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu, řezná rychlost $v_c = 250 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a měřené plochy ve směru osy „y“.

Z uvedených grafu 3 a 4 a tabulky č.13 pro vzorek materiálu 1.4301 ČSN17 240 při použití 5-ti břité frézy, vidíme v podélném a příčném směru os pozvolný nárůst u parametru drsnosti Ra a Rq . Rozdíl je mezi Ra a Rq nastává u rychlosti posuvu $v_f = 11,94 \text{ [m. min}^{-1}\text{]}$, kde v podélném směru křivka roste. V příčném směru osy „y“ křivka u Ra a Rq klesá.

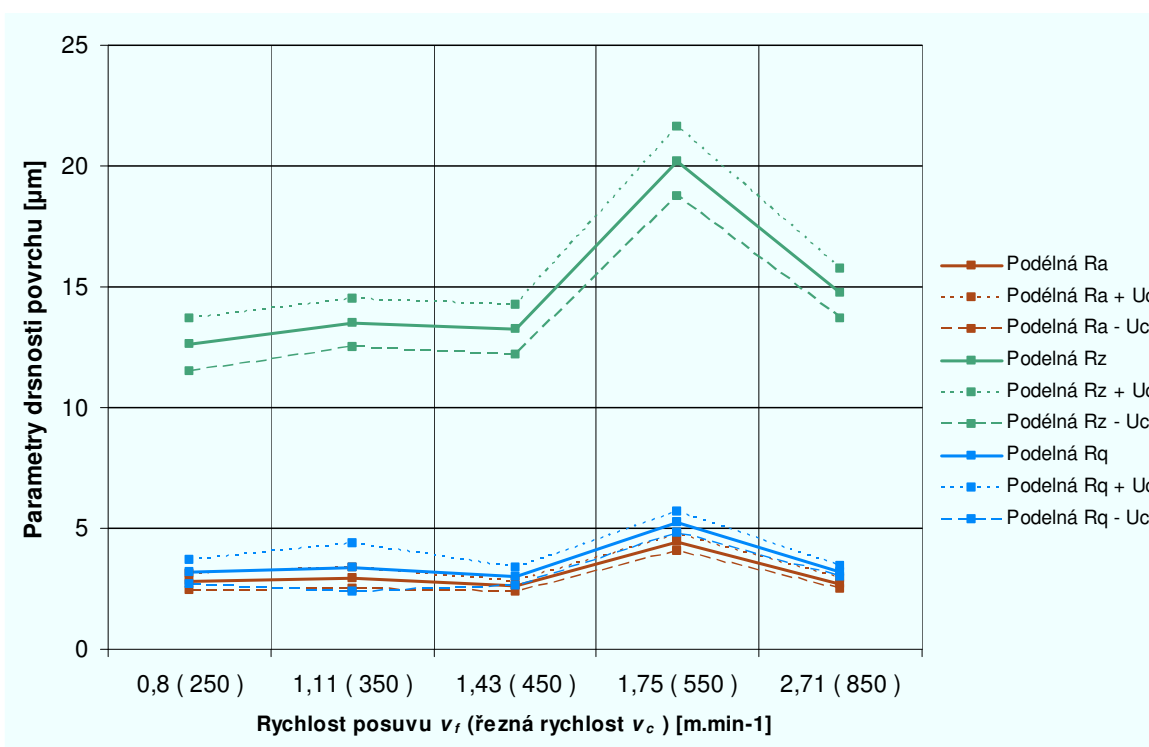
Při hodnocení parametru drsnosti Rz v podélném je náhlá rostoucí tendence křivky do rychlosti posuvu $v_f = 3,98 \text{ [m. min}^{-1}\text{]}$. Křivka následně roste od rychlosti posuvu $v_f = 11,94 \text{ [m. min}^{-1}\text{]}$. Při hodnocení parametru Rz v příčném směru má křivka pozvolnější rostoucí tendenci do rychlosti posuvu $v_f = 3,98 \text{ [m. min}^{-1}\text{]}$. Oproti podélnému směru křivka od rychlosti $v_f = 11,94 \text{ [m. min}^{-1}\text{]}$ náhle klesá.

V tabulce vidíme rozšířené kombinované nejistoty, které se liší v podélném a příčném měření v závislosti na rychlost posuvu $v_f \text{ [m. min}^{-1}\text{]}$. Z naměřených, vypočtených a grafických znázorněných hodnot vyplývá, že v příčném směru drsnost povrchu $Ra \text{ [}\mu\text{m]}$ a $Rz \text{ [}\mu\text{m]}$ je nižší než v podélném směru. Nejnižší naměřený a vypočtený parametr drsnosti povrchu je při rychlosti posuvu $v_f = 0,8 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, v příčném směru má nejnižší hodnotu parametr drsnosti povrchu $Ra = 1,19 \pm 0,18 \text{ [}\mu\text{m]}$, $Rz = 6,54 \pm 0,65 \text{ [}\mu\text{m]}$ a $Rq = 1,49 \pm 0,23 \text{ [}\mu\text{m]}$. V podélném směru má nejnižší hodnotu parametr drsnosti povrchu $Ra = 2,78 \pm 0,35 \text{ [}\mu\text{m]}$, $Rz = 12,6 \pm 1,07 \text{ [}\mu\text{m]}$ a $Rq = 3,18 \pm 0,48 \text{ [}\mu\text{m]}$.

Tab. 13 Vypočtené hodnoty parametrů Ra , Rz a Rq pro posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm]

- Řezná rychlost $v_c = 250 - 850$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 0,8 - 2,71$ [m.min⁻¹], ve směru osy „x“

Plocha č.	Posuv na zub f_z [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Měřené parametry drsnosti povrchu - podélné „osa x“		
				Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
1	0,1	250	0,8	$2,78 \pm 0,35$	$12,6 \pm 1,07$	$3,18 \pm 0,48$
6		350	1,11	$2,93 \pm 0,42$	$13,49 \pm 1,01$	$3,37 \pm 0,98$
10		450	1,43	$2,60 \pm 0,23$	$13,24 \pm 1,04$	$3,01 \pm 0,37$
14		550	1,75	$4,41 \pm 0,36$	$20,22 \pm 1,44$	$5,27 \pm 0,43$
19		850	2,71	$2,71 \pm 0,21$	$14,74 \pm 1,04$	$3,22 \pm 0,24$

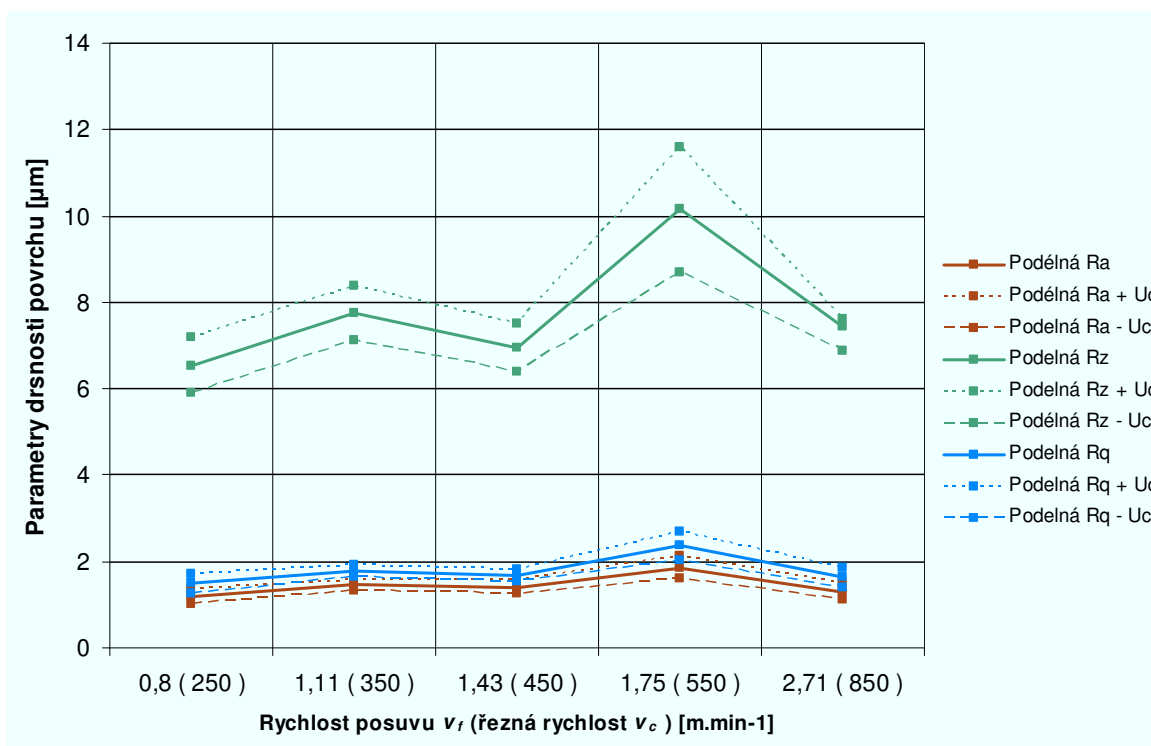


Graf 5 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu, posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm] a měřené plochy ve směru osy „x“.

Tab. 14 Vypočtené hodnoty parametrů Ra , Rz a Rq pro posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm]

- Řezná rychlost $v_c = 250 - 850$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 0,8 - 2,71$ [m.min⁻¹], ve směru osy „y“

Plocha č.	Posuv na zub f_z [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Měřené parametry drsnosti povrchu - příčná „osa y“		
				Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]
1	0,1	250	0,8	1,19 ± 0,18	6,54 ± 0,65	1,49 ± 0,23
6		350	1,11	1,45 ± 0,13	7,76 ± 0,63	1,78 ± 0,15
10		450	1,43	1,41 ± 0,15	6,96 ± 0,56	1,67 ± 0,14
14		550	1,75	1,86 ± 0,26	10,15 ± 1,44	2,36 ± 0,34
19		850	2,71	1,30 ± 0,19	7,44 ± 0,55	1,63 ± 0,23



Graf 6 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu, posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm] a měřené plochy ve směru osy „y“.

Z grafu a tabulek viz. graf 5 a 6 pro materiál 1.4301 při posuvu na zub $f_z = 0,1$ [mm] je průběh křivek srovnatelný příčným a podélným směru os. Ve směrech os „x, y“ dochází k rostoucí tendenci křivky při řezné rychlosti $v_c = 450$ [m.min⁻¹]. Rozdíl mezi uvedenými grafy je v podélném směru osy „x“, hodnoty parametru drsnosti povrchu jsou vyšší.

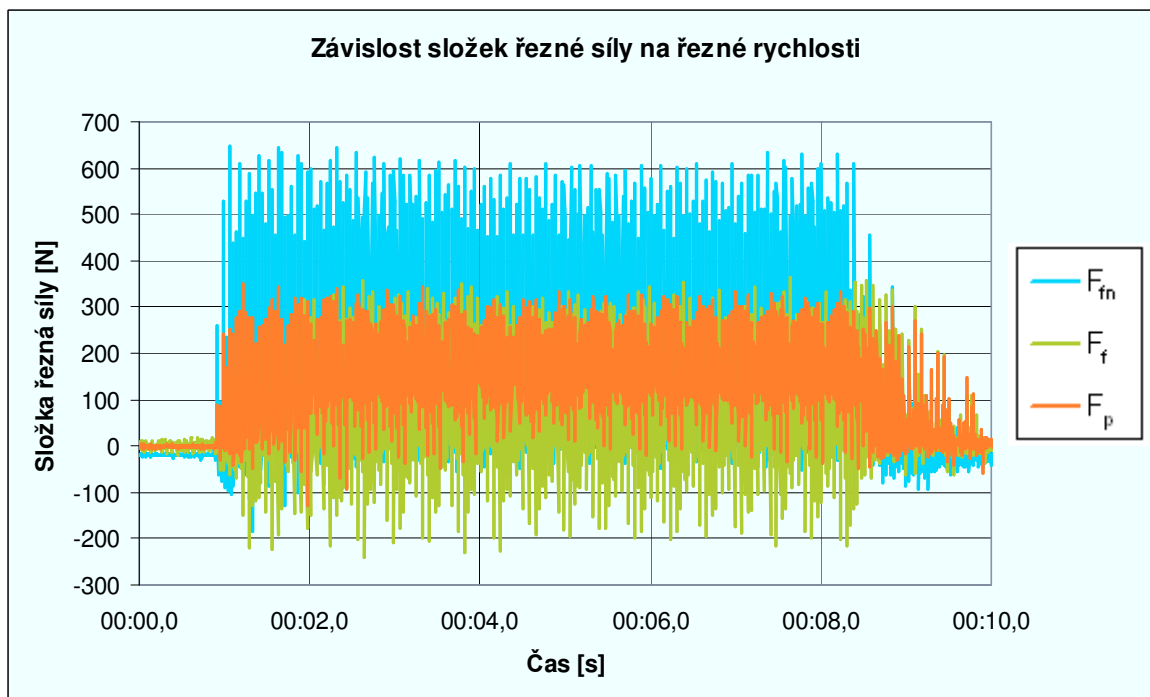
4.5. Vyhodnocení naměřených dat složek řezných sil

Vyhodnocení řezných sil je významné z hlediska vývoje nástrojů, návrhu strategie a frézování, vývoj systému pro sledování otupení břitů během procesu obrábění. Máme celou řadu metod, jak lze řeznou sílu určit.

Data z programu Dasy Lab verze 3.5 které byly naměřeny během experimentů byly zpracovány do přehledných grafů. Grafy vyjadřují závislost složek řezné síly na řezné rychlosti. Graf 7 při obrábění materiálu 1.4301 pro řezná rychlost $v_c = 250 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, posuv na zub $f_z = 0,1 \text{ [mm]}$ a rychlost posuvu $v_f = 0,8 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$. Grafy pro řezné rychlosti $v_c = 250 - 850 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, posuv na zub $f_z = 0,1 - 1,5 \text{ [mm]}$ jsou přiloženy v přílohách viz příloha D.

Z grafů byly odečteny Ø Max. složky řezné síly a Ø Min. složky řezné síly, které jsou uvedeny v tabulce 15. Následně byly spočítány dle uvedených vzorců síly F_{fn} , F_f a F_p , kde F_{fn} je síla normálová, F_f je síla posuvu a F_p je pasivní síla.

- Řezná rychlost $v_c = 250 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, posuv na zub $f_z = 0,1 \text{ [mm]}$ a rychlost posuvu $v_f = 0,8 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$



Graf 7 Průběh složek řezné síly při obrábění materiálu 1.4301 ČSN 17 240

4.5.1 Odečtené hodnoty složek řezných sil z grafů – ocel 1.4301 ČSN 17 240

Tab. 15 Odečtené hodnoty z grafů

Plocha č.	Posuv na zub f_z [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Ø Max. složka řezné síly			Ø Min. složka řezné síly		
					F_{fn} [N]	F_f [N]	F_p [N]	F_{fn} [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	0,1	250	1 592	0,8	512	258	279	-19	-75	63
2	0,5			3,98	849	435	579	297	15	263
3	1			7,96	1809	825	778	369	149	178
4	1,5			11,94	2019	1180	461	1080	885	217
5	2			15,92	2070	1408	996	850	322	170
6	0,1	350	2 228	1,11	419	231	296	-25	-27	-15
7	0,5			5,57	461	275	299	-44	-58	39
8	1			11,14	1362	974	714	686	239	212
9	1,5			16,71	3525	2094	1202	734	405	72
10	0,1	450	2 865	1,43	407	322	399	95	-139	39
11	0,5			7,16	920	527	588	97	-34	152
12	1			14,32	1357	722	1115	105	168	321
13	1,5			21,49	2268	654	904	319	146	209
14	0,1	550	3 501	1,75	458	385	622	95	-70	-10
15	0,25			4,38	1008	600	848	158	-58	192
16	0,5			8,75	852	419	737	250	-4	-108
17	1			17,51	2414	1010	1668	689	146	703
18	1,5			26,26	1447	603	513	87	209	173
19	0,1	850	5 411	2,71	375	285	690	-58	-170	81
20	0,25			6,76	671	395	1087	56	-144	139
21	0,5			13,53	883	478	893	144	-63	291

Znázorněný příklad výpočtu složek řezných sil pro materiál 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240 pro plochu č. 2 viz. tab. 15

$$\text{dynamika} = \text{Ø Max} - \text{Ø Min} \quad [N]$$

$$\text{dyn} = 849 - 297$$

$$\underline{\underline{\text{dyn} = 552 \text{ N}}}$$

$$Ff_n = \frac{\text{dyn}}{2} + \text{Ø Min} \quad [N]$$

$$Ff_n = \frac{552}{2} + 297 \quad (18)$$

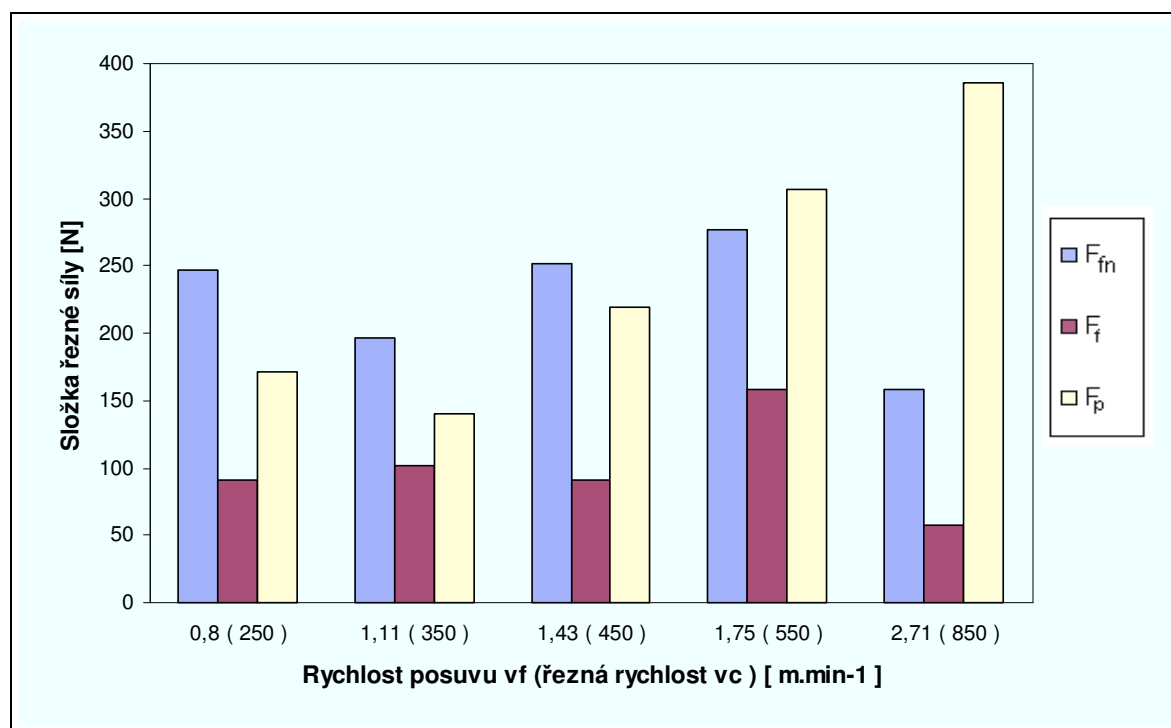
$$\underline{\underline{Ff_n = 573 \text{ N}}}$$

Tab. 16 Vypočtené hodnoty složky řezné síly F_{fn} , F_f a F_p

- Řezná rychlost $v_c = 250 - 850$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 0,8 - 2,71$ [m.min⁻¹]

Plocha č.	Posuv na zub f_z [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Vypočtené složky řezné síly		
				F_{fn} [N]	F_f [N]	F_p [N]
1	0,1	250	0,8	247	92	171
6		350	1,11	197	102	141
10		450	1,43	251	92	219
14		550	1,75	277	158	306
19		850	2,71	159	58	386

Z vypočtených složek řezných sil F_{fn} , F_f a F_p v uvedených tabulce 16 byly sestrojeny sloupkové grafy, které vyjadřují závislost řezných sil na rychlosti posuvu.



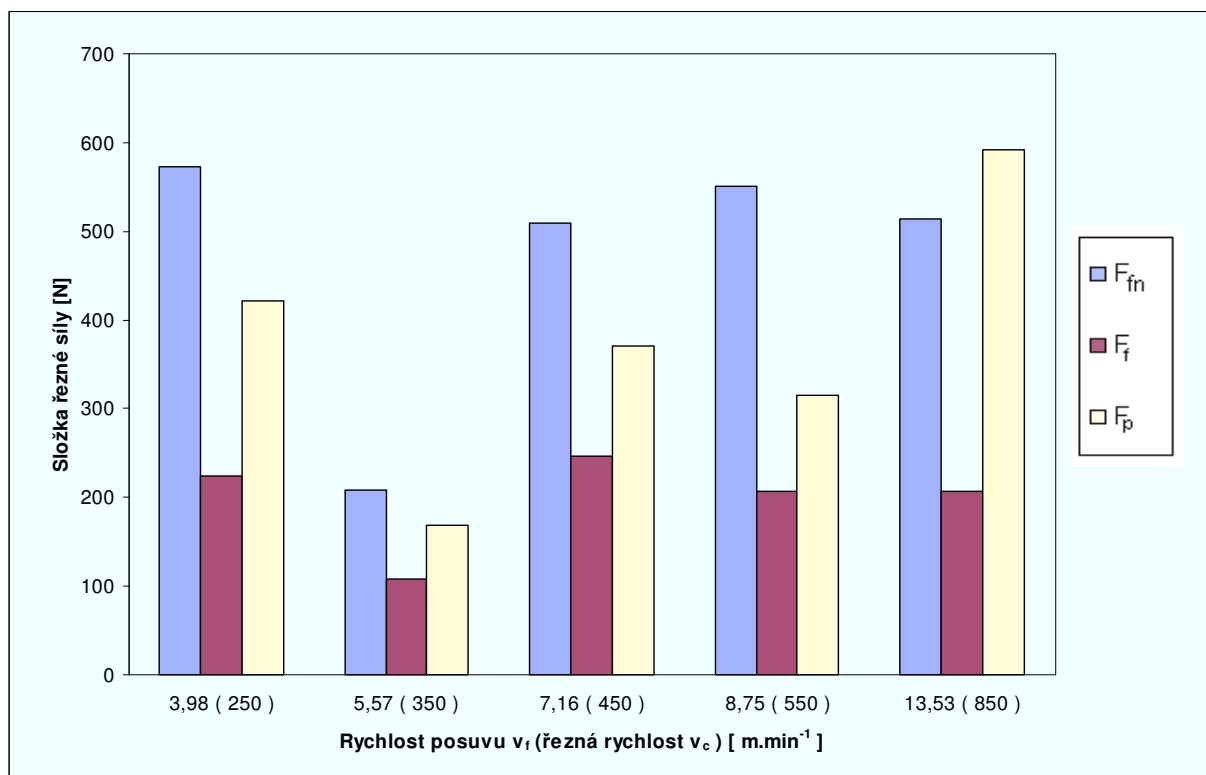
Graf 8 Průběh složek celkové řezné síly F_{fn} , F_f a F_p při řezné rychlosti $v_c = 250 - 850$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 0,1$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 0,8 - 2,71$ [m.min⁻¹].

Z grafu vidíme, že se zvyšující se rychlostí roste síla F_p . Složka řezné síly F_f klesá při řezné rychlosti $v_c = 850$ [m.min⁻¹]. Při řezné rychlosti $v_c = 350$ [m.min⁻¹] mají všechny 3 složky řezné síly nejnižší hodnoty, tedy tato rychlost se jeví jako nejvhodnější zvolená při opracování.

Tab. 17 Vypočtené hodnoty složky řezné síly F_{fn} , F_f a F_p

- Řezná rychlost $v_c = 250 - 850$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 0,5$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 3,98 - 13,53$ [m.min⁻¹]

Plocha Σ	Posuv na zub f_z [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Vypočtené složky řezné síly		
				F_{fn} [N]	F_f [N]	F_p [N]
2	0,5	250	3,98	573	225	421
7		350	5,57	209	109	169
11		450	7,16	509	247	370
16		550	8,75	551	208	315
21		850	13,53	514	208	592



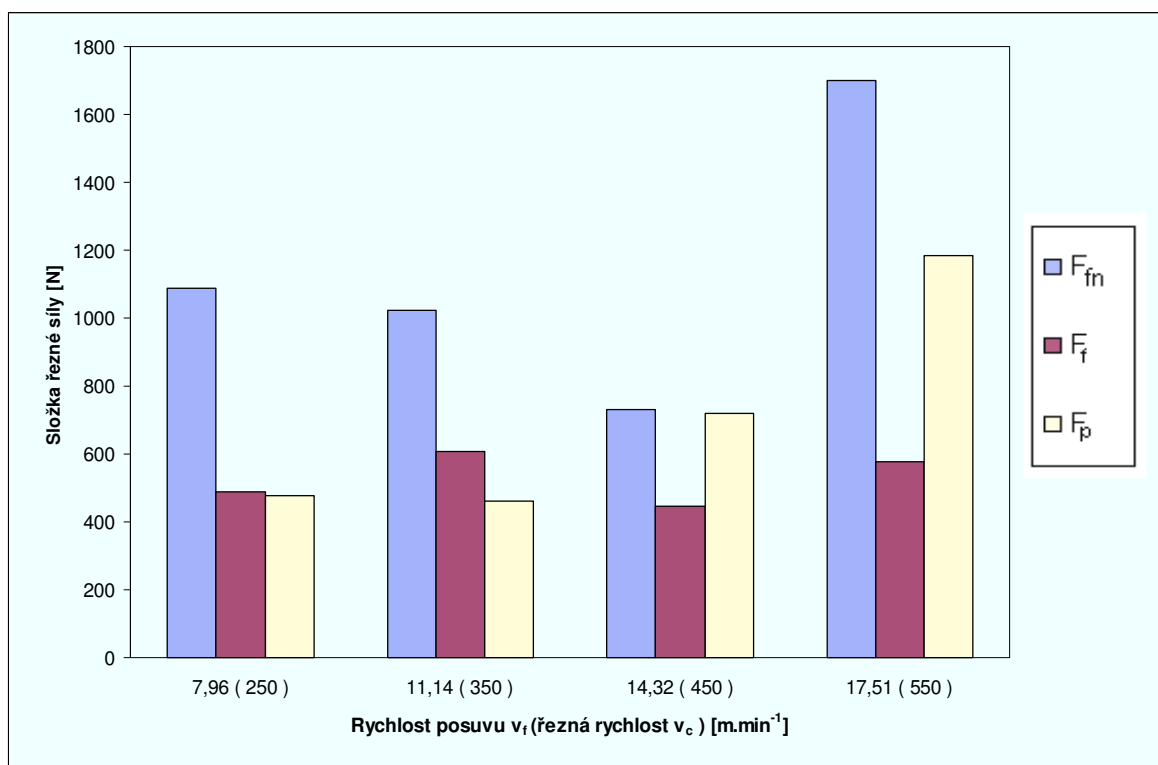
Graf 9 Průběh složek celkové řezné síly F_{fn} , F_f a F_p při řezné rychlosti $v_c = 250 - 850$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 0,5$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 3,98 - 13,53$ [m.min⁻¹].

Z grafu je zřejmé, že síla F_{fn} , F_f je ze všech řezných rychlostech přibližně stejná až na řeznou rychlost $v_c = 350$ [m.min⁻¹]. Složka řezné síly F_p je nejvyšší při řezné rychlosti $v_c = 850$ [m.min⁻¹]. Nejvhodněji zvolené podmínky pro posuv na zub $f_z = 0,5$ [mm] je řezná rychlost $v_c = 350$ [m.min⁻¹] a rychlost na zub $v_f = 5,57$ [m.min⁻¹], kdy složky řezných sil jsou nejnižší a skoro stejné.

Tab. 18 Vypočtené hodnoty složky řezné síly F_{fn} , F_f a F_p

- Řezná rychlost $v_c = 250 - 550$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 1,0$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 7,96 - 17,51$ [m.min⁻¹]

Plocha č.	Posuv na zub f_z [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Vypočtené složky řezné síly		
				F_{fn} [N]	F_f [N]	F_p [N]
3	1,0	250	7,96	1089	487	473
8		350	11,14	1024	607	463
12		450	14,32	731	445	718
17		550	17,52	1702	578	1186



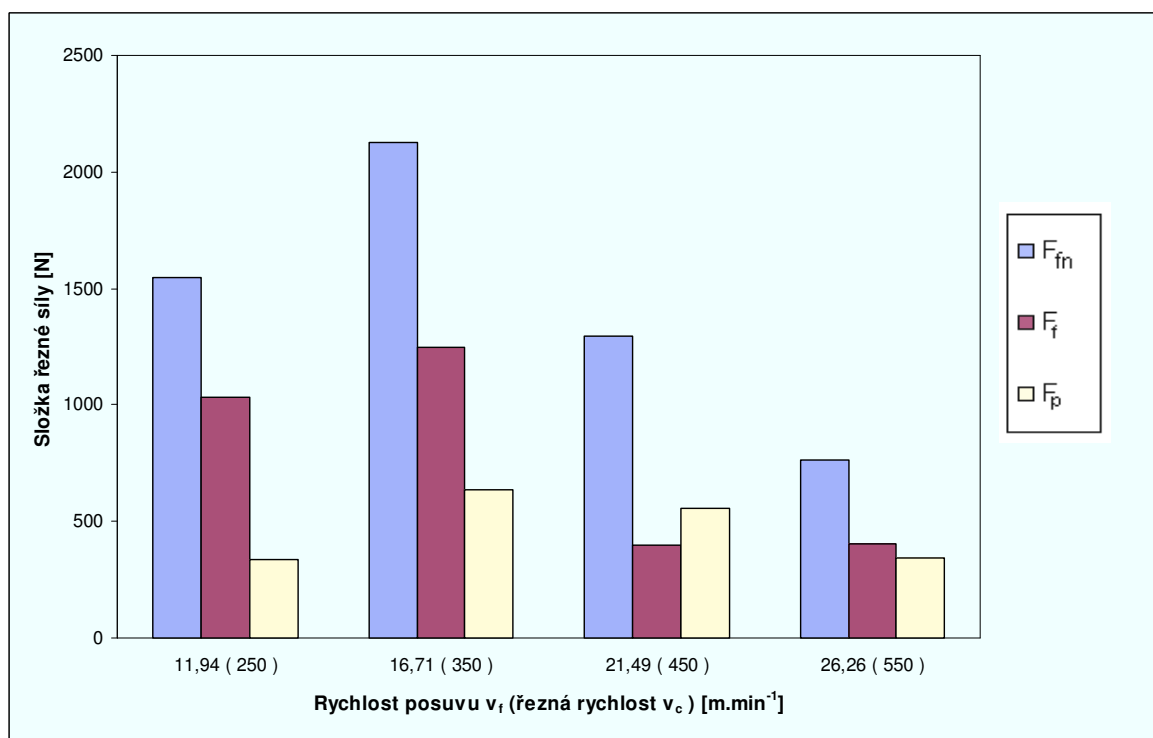
Graf 10 Průběh složek celkové řezné síly F_{fn} , F_f a F_p při řezná rychlost $v_c = 250 - 550$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 1,0$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 7,96 - 17,52$ [m.min⁻¹].

Z grafu při posuvu na zub $f_z = 1,0$ [mm] jsou nejvhodnější podmínky pro složky řezné síly F_{fn} , F_f , F_p při rychlosti $v_c = 450$ [m.min⁻¹], síly F_p rostou se zvyšující se řeznou rychlostí.

Tab. 19 Vypočtené hodnoty složky řezné síly F_{fn} , F_f a F_p

- Řezná rychlost $v_c = 250 - 550$ [m.min⁻¹], posuv na zub $f_z = 1,5$ [mm] a rychlost posuvu $v_f = 7,96 - 17,51$ [m.min⁻¹]

Plocha č.	Posuv na zub f_z [mm]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Vypočtené složky řezné síly		
				F_{fn} [N]	F_f [N]	F_p [N]
4	1,5	250	11,94	1550	1033	339
9		350	16,71	2130	1250	637
13		450	21,49	1294	400	557
18		550	26,26	767	406	343

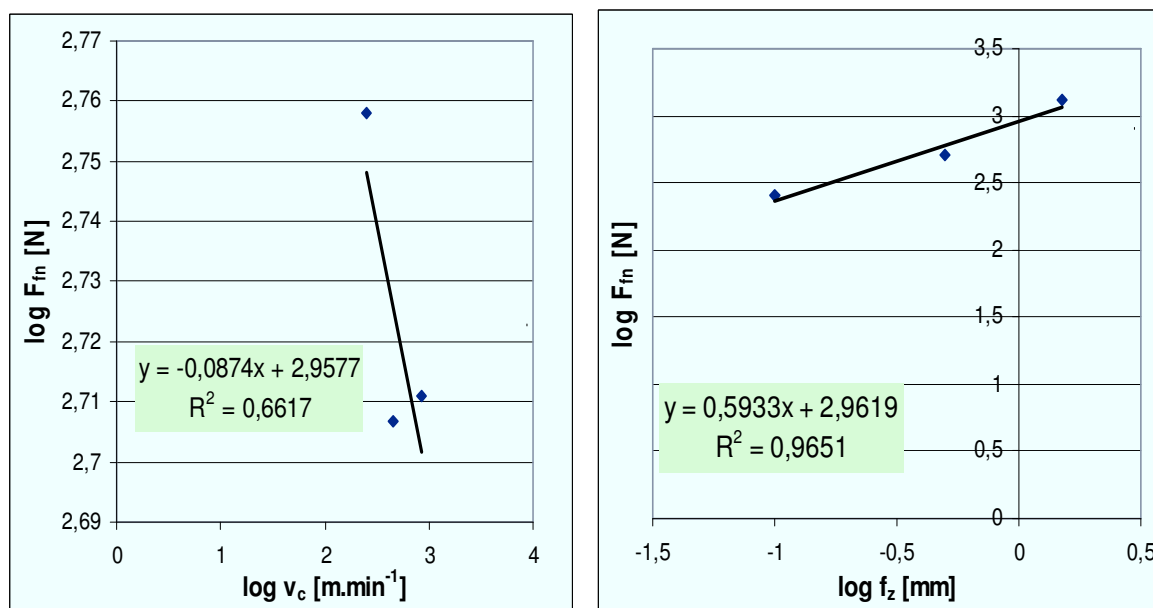


Graf 11 Průběh složek celkové řezné síly F_{fn} , F_f a F_p při řezné rychlosti $v_c = 250 - 550$ [m.min⁻¹], posuvu na zub $f_z = 1,5$ [mm] a rychlosti posuvu $v_f = 11,94 - 26,26$ [m.min⁻¹].

Z průběhu složek celkových řezných sil F_{fn} , F_f , F_p je nejlepší řezná rychlost $v_c = 550$ [m.min⁻¹], hodnoty těchto složek jsou nejnižší a síly působí rovnoměrně..

4.5.2 Strukturální rovnice podle funkčních závislosti pro 2 proměnné

Byly zvoleny konstanty $v_c = 450 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, $f_z = 0,5 \text{ [mm]}$ a proměnné $v_c = 250, 450, 850 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a $f_z = 0,1; 0,5; 1,5 \text{ [mm]}$ z těchto hodnot byl sestrojen graf v logaritmické soustavě pro proměnnou řeznou rychlost f ($\log v_c$, $\log F_{fn}$) a pro proměnnou posuv na zub f ($\log f_z$, $\log F_{fn}$). K grafu byla zobrazena rovnice regrese a hodnota spolehlivosti R .



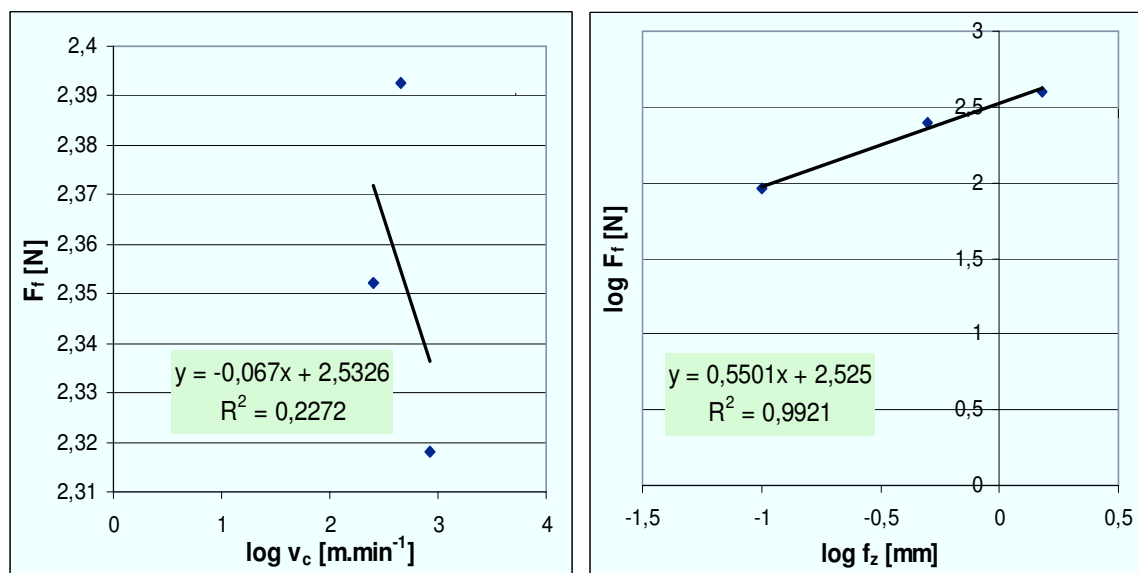
Graf 12 Celkové řezné síly $F_{fn} \text{ [N]}$ v logaritmické soustavě pro proměnné řezná rychlost $v_c \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a ($\log v_c$, $\log F_{fn}$) a posuv na zub $f_z \text{ [mm]}$ a ($\log f_z$, $\log F_{fn}$).

Z rovnice regrese byly vypočteny hodnoty „x“ a „y“ a ty byly dosazeny do strukturální rovnice.

$$F_{fn} = C_{F_{fn}} \cdot v_c^{X_{F_{fn}}} \cdot f_z^{Y_{F_{fn}}} \quad [N] \quad (19)$$

$$\underline{\underline{F_{fn} = 1465,54 \cdot v_c^{-0,09} \cdot f_z^{0,59} \quad [N]}}$$

Byly zvoleny konstanty $v_c = 450$ [m.min⁻¹], $f_z = 0,5$ [mm] a proměnné $v_c = 250, 450, 850$ [m.min⁻¹] a $f_z = 0,1; 0,5; 1,5$ [mm] z těchto hodnot byl sestrojen graf v logaritmické soustavě pro proměnnou řeznou rychlost f ($\log v_c, \log F_f$) a pro proměnnou posuv na zub f ($\log f_z, \log F_f$). K grafu byla zobrazena rovnice regrese a hodnota spolehlivosti R .



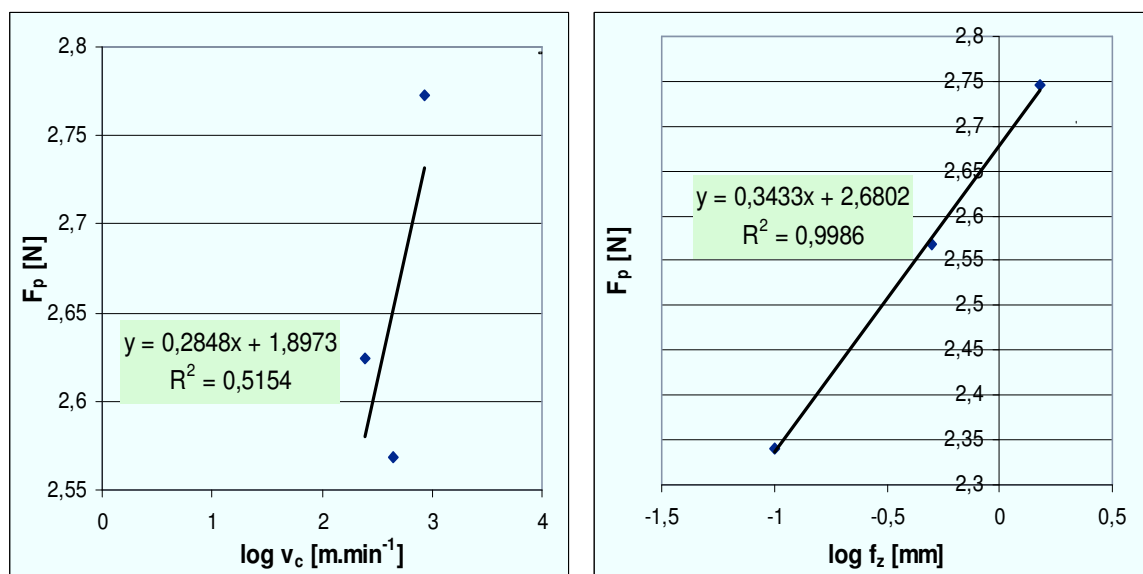
Graf 13 Celkové řezné síly F_f [N] v logaritmické soustavě pro proměnné řezná rychlost v_c [m.min⁻¹] f ($\log v_c, \log F_f$) a posuv na zub f_z [mm] f ($\log f_z, \log F_f$).

Z rovnice regrese byly vypočteny hodnoty „x“ a „y“ a ty byly dosazeny do strukturální rovnice.

$$F_f = C_{F_f} \cdot v_c^{X_{F_f}} \cdot f_z^{Y_{F_f}} \quad [N] \quad (20)$$

$$\underline{\underline{F_f = 501,75 \cdot v_c^{-0,07} \cdot f_z^{0,55} \quad [N]}}$$

Byly zvoleny konstanty $v_c = 450 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$, $f_z = 0,5 \text{ [mm]}$ a proměnné $v_c = 250, 450, 850 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a $f_z = 0,1; 0,5; 1,5 \text{ [mm]}$ z těchto hodnot byl sestrojen graf v logaritmické soustavě pro proměnnou řeznou rychlost f ($\log v_c, \log F_p$) a pro proměnnou posuv na zub f ($\log f_z, \log F_p$). K grafu byla zobrazena rovnice regrese a hodnota spolehlivosti R .



Graf 14 Celkové řezné síly $F_p \text{ [N]}$ v logaritmické soustavě pro proměnné řezná rychlost $v_c \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a posuv na zub $f_z \text{ [mm]}$.

Z rovnice regrese byly vypočteny hodnoty „x“ a „y“ a ty byly dosazeny do strukturální rovnice.

$$F_p = C_{F_p} \cdot v_c^{x_{F_p}} \cdot f_z^{y_{F_p}} \quad [\text{N}] \quad (21)$$

$$\underline{\underline{F_p = 92,11 \cdot v_c^{0,28} \cdot f_z^{0,34} \quad [\text{N}]}}$$

5. ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V diplomové práci jsem se zabýval obráběním korozivzdorných ocelí. Pro měření drsnosti povrchu obráběného materiálu byla použita ocel 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240. K opracování této oceli byla použita 5-ti břitá fréza, a samotné opracování bylo provedeno na stroji HURCO VMX 30t. Po opracování na uvedeném stroji byly vzorky ocelí měřeny na přístroji drsnoměru Surftest SJ-210. Byly sledovány parametry drsnosti Ra , Rz a Rq v příčném a podélném směru. Naměřené a vypočtené hodnoty byly zpracovány do grafu a tabulek. Nejlepšího parametru drsnosti povrchu je při rychlosti posuvu $v_f = 0,8 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a parametrů $Ra = 1,19 \pm 0,18 \text{ [}\mu\text{m]}$, $Rz = 6,54 \pm 0,65 \text{ [}\mu\text{m]}$ a $Rq = 1,49 \pm 0,23 \text{ [}\mu\text{m]}$ v příčném směru. V podélném směru má nejnižší hodnotu parametr drsnosti povrchu $Ra = 2,78 \pm 0,35 \text{ [}\mu\text{m]}$, $Rz = 12,6 \pm 1,07 \text{ [}\mu\text{m]}$ a $Rq = 3,18 \pm 0,48 \text{ [}\mu\text{m]}$.

Při experimentálním měření řezných sil při čelním frézování byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER typ 9255B. Data z měření byly zaznamenány do programu Dasy Lab verze 3.5. Výstupem těchto dat z programu je soubor tabulek a grafu. Grafy vyjadřují závislost složek řezné síly na řezné rychlosti. Veškeré zvolené podmínky byly zpracovány do přehledného diagramu viz. str. 29. Z grafu byly odečteny hodnoty složky řezných sil F_{fn} síla normálová, F_f síla posuvu a F_p pasivní síla. Z vypočtených složek uvedených řezných byly sestrojeny sloupcové grafy, závislost řezných sil na rychlosti posuvu. Z těchto grafu vyplývá, že nejvhodnější zvolená podmínka je řezná rychlost $v_c = 350 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ při rychlosti posuvu $v_f = 1,11 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$. Všechny 3 složky řezné síly mají nejnižší hodnoty tedy tato rychlost se jeví jako nejvhodnější zvolena po opracování oceli 1.4301 (X5CrNi18-10) ČSN 17 240 při posuvu na zub $f_z = 0,1 \text{ [mm]}$. Hodnoty drsnosti pro tyto podmínky jsou $Ra = 2,93 \pm 0,42 \text{ [}\mu\text{m]}$ $Rz = 13,49 \pm 1,01 \text{ [}\mu\text{m]}$ $Rq = 3,37 \pm 0,98 \text{ [}\mu\text{m]}$ v podélném směru a v příčném směru $Ra = 1,45 \pm 0,13 \text{ [}\mu\text{m]}$ $Rz = 7,76 \pm 0,63 \text{ [}\mu\text{m]}$ $Rq = 1,78 \pm 0,15 \text{ [}\mu\text{m]}$ v příčném směru. Tyto hodnoty, jak můžeme z průběhu grafu č.5 a 6 vidět, patří mezi nejlepší parametry drsnosti pro dané podmínky.

V závěru práce byly zvoleny konstanty $v_c = 450 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a $f_z = 0,5 \text{ [mm]}$. Z vybraných dat byl sestrojen graf a následně rovnice regrese. Po dosazení byly sestaveny strukturální rovnice pro řezné složky sil. Případné chyby mohly vzniknout při nepřesném měření, při nepřesnosti upínání vzorku oceli a dalšími faktory, které provázejí celý proces frézování.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Příručka pro technology: *Obrábění nerezových ocelí*. PATRIK DE VOS, MSc. [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/CorpWeb/Slovakia/Aktuality/Patrick%20De%20Vos%20-%20cyklus/1/Seco_12bez%20reklamy.pdf>.
- [2] PRAMENT TOOLS, s.r.o., Šumperk, Česká republika. *Frézování*. [online]. [cit.2013-02-01]. Dostupné z www: <<http://www.pramet.com/cz/ke-stazeni.html>>.
- [3] ISO 513 PRAMENT TOOLS, s.r.o., Šumperk, Česká republika. *Frézování*. [online]. [cit.2012-04-05]. Dostupné z www: <<http://www.pramet.com/cz/ke-stazeni.html>>.
- [4] SECO TOOLS AB. *Frézovací nástroje* [online]. [cit.15.3.2012]. Dostupné z: <<http://secotools.com>>.
- [5] *Korozivzdorné oceli - vlastnosti*. [online]. Lucembursko: EURO Inox, 2002, 28 s. ISBN 2-87997-082-2 [cit. 2013-12-27] Dostupné z: <http://www.euro-inox.org/pdf/map/StainlessSteelProperties_CZ.pdf>.
- [6] *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály*. [online]. [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <http://ateam.zcu.cz/korozivzdorne_oceli_3.pdf>.
- [7] *Feritická ocel*. [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.google.cz/imgres?q=ferritic+steel&um=1&rls=com.microsoft:cs:IE-SearchBox&rlz=117ADBR_en&hl=cs&biw=1280&bih=870&tbm=isch&tbnid=YzM8ps37CJab-M:&imgrefurl=http://www.emeraldinsight.com/journals.htm%3Farticleid%3D1798798%26show%3Dhtml&docid=ltTkW-GMQKt0M&imgurl=http://www.emeraldinsight.com/content_images/fig/1280560403003.png&w=661&h=437&ei=OL-GUd75FIfMsgaGoYCwCA&zoom=1&iact=rc&dur=390&page=1&tbnh=135&tbnw=216&start=0&ndsp=35&ved=1t:429,r:2,s:0,i:85&tx=118&ty=90>.
- [8] *Austenitická ocel: legovaná Ni*. [online]. [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Austenit>>.
- [9] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999, 437 s. ISBN 80-200-0671-0.

- [10] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. *Soustružení korozivzdorných ocelí*. Pře. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o., 2001. 88 s. Přel.z: Stainless steel turbíny.
- [11] MM Průmyslové spektrum: *Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiál* Praha: MM publishing, s.r.o., duben 2003 [cit.2012-2-5]: dostupné z: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2-2.html>>.
- [12] DOSTÁL, Petr. *Integrita povrchu frézovaných tvarových ploch*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007.
- [13] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2006. s. 112 ISBN 80-248-0672-1
- [14] ZEMAN, P.; ŠAFEK J. ; VANĚČEK D. *Technologie HSC*. Fakulta strojní, ČVUT Praha, Web: <<http://technik.ihned.cz>>.
- [15] HUMÁR, A. *Technologie I*. [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia v oboru „Strojírenská technologie“ VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138 s. URL:<<http://www.ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory>>.
- [16] NESLUŠAN, M.: *Sústružení kalených ocelí*, Edis Žilina 2009, ISBN 978-80-554-104-1
- [17] CZÁN, A: *Merenie reznych sil*: informační materiály, Žilina 2013
- [18] [online]. [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <<http://kharkov.prom.ua/p9378495-frezernyj-obrabatyvayuschij-tsentr.html>>.
- [19] [online]. [cit. 2013-04-05]. Dostupné z: <<http://www.iscar.com/Ecat/item.asp?app=61&mapp=ML&fnum=2835&GFSTYP=M&tool=T&cat=3105714&lang=EN>>.
- [20] [online]. [cit. 2013-04-05]. Dostupné z:<<http://www.iscar.com/Ecat/item.asp?app=&mapp=ML&fnum=1591&GFSTYP=M&tool=I&cat=5698085&lang=EN>>.
- [21] Mitutoyo Česko s.r.o.: *Drsnoměry měření jakosti povrchu*. [online]. Teplice: Česká republika, 2006 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <<http://www.mitutoyo.cz/files/prospekty/prc1344-2.pdf>>.
- [22] Trojsložkový piezoelektrický dynamometr Kistler typ 9255B. [online]. [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013612003445>>.

- [23] *Cutting force measurement*, Kistler. 2010, s. 44
- [24] INOX, spol. s r. o.: *Nerezový hutní materiál* [online]. Praha 4, 2009 [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: <<http://inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>>.
- [25] Fürbacher, I.; Macek, M.; Steidl, J. *Lexikon technických materiálů 2.1.* Praha: Verlag Dashöfer – nakladatelství, 2001. Dostupné z www: <<http://www.dashofer.cz>>.
- [26] Jurok D. *Hodnocení drsnosti povrchu po vysokorychlostním obrábění*: Bakalářská práce, Ostrava: VŠB-TOU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011. s. 50
- [27] Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *AUTOMA – časopis pro automatizační techniku*, 2001, č. 7 - 8, s. 50-54. ISSN 1210-9592
- [28] Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *AUTOMA – časopis pro automatizační techniku*, 2001, č. 10, s. 52-56. ISSN 1210-9592.
- [29] NOVÁKOVÁ J. *Kreativní tvorba produktů ve vysokorychlostním obrábění*: Disertační práce, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010. s. 128.
- [30] BRYCHTA, Josef. *Technologie II.* 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007-2008. ISBN 978-80-248-1822-12.
- [31] HAVRILA, Michal; ZAJAC, Jozef; BRYCHTA, Josef; JURKO, Jozef; *Top trendy v obrábění, I. část-obráběné materiály*. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [32] ZAJAC, Jozef; BRYCHTA, Josef; Čep Robert. *Top trendy v obrábění, II. část-Nástrojové materiály*. Žilina: Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.

SEZNAM PŘÍLOH

- PŘÍLOHA A Technické parametry stroje HURCO VMX 30t [18]
- PŘÍLOHA B Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti povrchu a grafy v závislosti rychlosti posuvu v_f [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
- PŘÍLOHA C Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti povrchu a grafy v závislosti řezné rychlosti v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat, vedoucí diplomové práce Ing. et Ing. Mgr. Jana Petru, Ph.D. za trpělivost, cenné připomínky a rady při zpracování této diplomové práce.